



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Optimierung der Buslinie 450 in Braunschweig durch On-Demand-Zubringer

Masterarbeit im Master-Studiengang Bauingenieurwesen

Fachbereich 6 der Fachhochschule Münster

Vorgelegt von:

Maria Giuliana Armellini

Matrikel-Nummer: 920002

Münster, 15 Juli 2019

Referent:

Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. M. R. Lühder (FH Münster)

Prof. Dr.-Ing. B. Hartz (FH Münster)

Dipl. Inf. L. Bieker-Walz (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit bestätige ich, dass ich die Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aktuell gültigen „Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Fachhochschule Münster“ habe ich beachtet.“

Münster, 15.07.2019

Ort, Datum

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Unterschrift

Erklärung zum Nutzungsrecht

Die Abschlussarbeit unterliegt als „persönlich geistige Schöpfung“ der/des Studenten/in (im Folgenden als „Urheber/in“ bezeichnet) dem Urheberrechtsschutz des § 2 UrHG. Der/die Urheber/in hat die alleinige Befugnis, darüber zu entscheiden, ob, wem und in welcher Form die Arbeit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Ihr/Ihm stehen das Vervielfältigungs- und Verarbeitungs- sowie das Bearbeitungsrecht zu.

Davon unberührt übertrage ich das Recht zur Verarbeitung und Vervielfältigung der Arbeit sowie sämtliche sonstige Verwertungsrechte an der Arbeit an den Betreuer.

Ferner bin ich damit einverstanden, dass die Betreuer meine Arbeit im Rahmen der Lehre, für Forschungsvorhaben, Projektbearbeitungen und Gutachten sowie zu Publikationen uneingeschränkt, unwiderruflich und unbefristet verwertet, nutzt und weitergibt, wobei ein Hinweis auf meine Arbeit erfolgen muss. Ich bin weiter damit einverstanden, dass meine Arbeit zur Einsicht in der Fachbereichsbibliothek steht und Thema und Zusammenfassung in Veröffentlichungen und auf digitalen Medienträgern der Fachhochschule erscheinen.

Des Weiteren bin ich damit einverstanden, dass meine Arbeit im Volltext oder Auszügen von der Fachhochschule Münster in das Internet zum kostenlosen Download eingestellt wird. Ich versichere, dass die zur Nutzung und Verwertung der Hochschule überlassene digitale Version meiner Abschlussarbeit mit der Papierversion identisch ist.

Ich versichere, dass Dritte wie z.B. Firmen, Einrichtungen außerhalb der Hochschule und sonstige Personen keine Nutzungs- und Verwertungsrechte an meiner vorgenannten Projekt-, Bachelor-, Masterarbeit zustehen bzw. dass ich das Einverständnis dieser Dritter zur Abgabe dieser Einverständniserklärung eingeholt habe bzw. einholen werde.

Münster, 15.07.2019

Ort, Datum

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Unterschrift

Aufgabenstellung



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Masterarbeit

Verkehrswesen

Maria Giuliana Armellini

Mat.-Nr. 920002

Fachbereich
Bauingenieurwesen

Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Martin R. Lühder

Prof. Dr.-Ing. B. Hartz

Corrensstraße 25
48149 Münster

Fon+49(0)2 51/83-65234

Fax+49(0)2 51/83-65235

luehder@fh-muenster.de

Thema: Optimierung der Buslinie 450 in Braunschweig durch On-Demand-Zubringer

Die Mobilitätswende als Teil der Energiewende ist alternativlos. Der Energieverbrauch durch Pendlerverkehre mit Bezug auf das stetig wachsende Oberzentrum Braunschweig ist nur ein Aspekt einer nicht mehr zu verantwortenden Verschwendung von Ressourcen. Daneben tritt gleichwertig die Unvereinbarkeit von Ansprüchen an das Wohnumfeld der Bevölkerung, an die Bereitstellung von Verkehrsraum für ökologisch verträgliche Verkehrsmittel sowie die ständig zunehmenden Emissionen aus dem Kfz-Verkehr wie Schall, Abgas und Feinstaub

Hier sind nunmehr insbesondere Ansätze gefordert, die zu einem nennenswerten Umstieg auf den ÖPNV, also Bus und Bahn führen. Ein Ansatz ist die Ergänzung von Schnellbuslinien durch sogenannte „On-Demand“-Verkehrsmittel, welche die Sammel- und Zubringerfunktionen im ÖPNV-Netz darstellen.

1. Beurteilen Sie die aktuelle Verkehrssituation auf Grundlage von Verkehrsbelastungen, Verkehrsprognosen sowie unter Berücksichtigung der städtebaulichen Entwicklungen längs der Bus-Achse 450
2. Erarbeiten Sie mögliche Verbesserungen des Linienverlaufs unter besonderer Berücksichtigung der Busbeschleunigung.
3. Entwickeln Sie ein Modell auf der Basis von „On-Demand“ Verkehrsmitteln als Zubringer zur Buslinie 450 in Braunschweig in mehreren Varianten
4. Bewerten Sie diese Varianten und begründen Sie die Wahl der Vorzugsvariante mit Hilfe der Verkehrssimulation SUMO (Simulation of Urban Mobility).
5. Dimensionieren Sie das Angebot und gestalten Sie die Mobilitätsschnittpunkte (Übergabehaltstellen incl. Radabstellanlagen und P+R).
6. Entwickeln Sie ein Betriebsprogramm für die Buslinien und „On-Demand“-Verkehrsmittel.
7. Schätzen Sie die Bau und Betriebskosten für die gewählte optimale Variante.
8. Erarbeiten Sie eine 3D-Simulation aus mit dem Programm SUMO sowie ggf. Standfotos der Mobilitätsschnittpunkte
9. Fazit, Bericht mit Plänen, auch in elektronischer Form, Präsentation.

Ausgabe: 17.02.2019

(Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. M. R. Lühder)

(Prof. Dr.-Ing. B. Hartz)

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht den Einsatz eines Trunk-and-Feeder-Systems zur Optimierung des bestehenden ÖPNV in einer ländlichen Region nahe Braunschweig. Das System deckt die stark nachgefragte Verbindung in die Stadt Braunschweig mit einem Bus-Rapid-Transit (BRT) System ab. Das BRT-System wird durch ein On-Demand (OD) Zubringersystem ergänzt. Ebenfalls ist die Ergänzung des BRT-Systems durch den nichtmotorisierten Individualverkehr (NMIV) vorgesehen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Analyse der möglichen Implementierung und des theoretischen Potenzials des vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems. Des Weiteren analysiert die Arbeit das Bündelungspotenzial, die Kapazität und die Leistung des OD-Zubringersystems.

Hierfür werden zuerst die vorgeschlagenen Systeme (BRT, OD-Zubringer und NMIV) und deren Mobilitätsschnittpunkte (Mobilstationen) geplant. Anschließend wird das Verbesserungspotenzial des geplanten Trunk-and-Feeder-Systems im Vergleich zum bestehenden ÖPNV mithilfe von Verkehrssimulationen mit dem Programm „Eclipse SUMO“ quantitativ abgeschätzt. Die Datengrundlage für die Simulationen basiert auf einer bestehenden Verkehrssimulation der Stadt Braunschweig. Die Simulation der OD-Zubringersysteme erfolgte mit einem selbst entwickelten Algorithmus, der anhand der erhaltenen Anfragen an das System die optimale Route für jedes Fahrzeug sucht. Die Erzeugung der Anfragen an das OD-Zubringersystem wurde mit dem Programm „Ver_Bau“ anhand der Einwohnerzahl geschätzt.

Die Simulationsergebnisse zeigen das hohe Potenzial und die Vorteile des vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems deutlich. Die Reisezeiten von Tür zu Tür wurden im Durchschnitt um 46% (17 Minuten) reduziert, wodurch die durchschnittlichen Umwegfaktoren von 1,77 auf 0,95 gesunken sind. Dies entspricht einer gesteigerten Attraktivität des ÖPNV im Vergleich zum privaten Fahrzeug. Durch die Nutzung des Trunk-and-Feeder-Systems konnte das Betriebsgebiet auf zwei weitere Dörfer ausgebaut werden, sodass ein großes Potenzial für Neukundengewinnung besteht und die Problematik der fehlenden Mobilität in ländlichen Räumen adressiert. Dank der Verminderung der Umlaufzeiten kann mit vier BRT-Bussen eine Taktung von 15-Minuten gewährleistet werden. Die Analyse verschiedener Fuhrparkvarianten für die OD-Zubringersysteme zeigte, dass die Anwendung von zwei kleinen Fahrzeugen mit einer Kapazität von je sechs Passagieren die optimale Variante darstellt. Die durchschnittliche Anzahl der pro Fahrt und Fahrzeug beförderten Personen liegt abhängig von dem OD-Zubringersystem zwischen vier und sieben.

Die Personalkosten der OD-Zubringersysteme (Fahrer) sind mit 83% die kostenintensivste Position der Betriebskosten, sodass der Einsatz von autonomen Fahrzeugen in naher Zukunft zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beitragen kann.

Als zusammenfassendes Ergebnis ist festzuhalten: Der Einsatz von Trunk-and-Feeder-Systemen mit OD-Zubringersystemen kann die Attraktivität des ÖPNV in ländlichen Räumen steigern.

Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	V
<i>Verzeichnis der Tabellen</i>	VII
<i>Verzeichnis der Bilder</i>	VIII
<i>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</i>	X
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Mobilität im ländlichen Raum	3
2.2 Mobility-on-Demand	7
2.3 Bus-Rapid-Transit	12
3 Grundlage Verkehrssimulationen	16
3.1 Simulation of Urban Mobility (SUMO)	17
3.2 Der Dial-A-Ride-Algorithmus	18
4 Fallstudie Braunschweig	24
4.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets	24
4.1.1 Verkehrsinfrastruktur	26
4.1.2 Verkehrsangebot	28
4.1.3 Zukünftige Situation und potenzielle Problematik	29
4.2 Optimierung des ÖPNV-Angebots	31
4.2.1 Mobilstationen	32
4.2.1.1 Mobilstation Vechelde	34
4.2.1.2 Mobilstation Denstorf	36
4.2.1.3 Mobilstation Lamme	39
4.2.2 Bus-Rapid-Transit-System	41
4.2.2.1 Fahrplan	41
4.2.2.2 Fahrzeuge	41
4.2.3 On-Demand-Zubringersysteme	42
4.2.3.1 Servicebereich und Haltestellen	42
4.2.3.2 Fahrplan	43
4.2.3.3 Fahrzeuge	43
4.2.3.4 Buchung und Routing	44
4.2.4 Nichtmotorisierter Individualverkehr	45
4.2.5 Tarifsysteem, Smartphone-App und Kommunikation	46
4.3 Verkehrssimulationsszenarien	47
4.3.1 Datengrundlage der Simulationsszenarien	47
4.3.1.1 Validierung	48

4.3.2	Aktuelle Buslinie 450 (Szenario 0).....	49
4.3.2.1	Ergebnisse.....	50
4.3.3	Simulation der Fuhrparkvarianten der On-Demand-Zubringersysteme	54
4.3.3.1	Schätzung der Nachfrage.....	55
4.3.3.2	Ergebnisse.....	57
4.3.4	Trunk-and-Feeder-System (Szenario 1).....	66
4.3.4.1	Ergebnisse.....	67
4.3.5	Vergleich der Szenarien	73
4.3.6	Diskussion der Ergebnisse	74
4.4	Optimierungspotenzial des ÖPNV in der Innenstadt	75
4.5	Betriebsprogramm und Kostenschätzung	78
4.5.1	Betriebsprogramm der Bus-Rapid-Transit-Linie.....	78
4.5.2	Betriebsprogramm der On-Demand-Zubringersysteme	79
4.5.3	Kostenschätzung	80
5	<i>Zusammenfassung und Ausblick.....</i>	84
	<i>Literaturverzeichnis.....</i>	86
	<i>Anhangsverzeichnis.....</i>	A.1

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1 Bedienungsformen im ÖPNV	6
Tabelle 4-1 Bestehende Buslinien zwischen dem Untersuchungsgebiet und Braunschweig	29
Tabelle 4-2 Buslinie 450: Fahrzeiten und Entfernungen zwischen Haltestellen	52
Tabelle 4-3 Buslinie 450: Reisezeiten Tür-zu-Tür	53
Tabelle 4-4 Reisezeiten mit dem Pkw und den bestehenden Buslinien	54
Tabelle 4-5 Modalsplit der Fahrten mit Quelle oder Ziel in Braunschweig nach Ort	55
Tabelle 4-6 Modalsplit der Fahrten bis zur/von der Mobilstation nach Ort.....	56
Tabelle 4-7 BRT-Linie: Fahrzeiten und Entfernungen zwischen Haltestellen	68
Tabelle 4-8 OD-Systeme: Verteilung Besetzungsgrad.....	69
Tabelle 4-9 OD-Systeme: Tägliche Fahrzeiten, Kilometerleistung und Batterieverbrauch	70
Tabelle 4-10 Bike+BRT: Reisezeiten Tür-zu-Tür	71
Tabelle 4-11 OD+BRT: Reisezeiten Tür-zu-Tür	72
Tabelle 4-12 Reisezeiten mit dem Pkw und dem Trunk-and-Feeder-System.....	72
Tabelle 4-13 Reisezeiten mit den bestehenden Buslinien und dem Trunk-and-Feeder.....	73
Tabelle 4-14 Reisezeiten mit der Optimierung des BRT-Systems in der Stadt	77
Tabelle 4-15 Betriebsplan BRT-Linie	79
Tabelle 4-16 Baukosten der Mobilstationen.....	80
Tabelle 4-17 Investitionskosten	81
Tabelle 4-18 Jährliche Betriebskosten.....	82
Tabelle A 2-1 Verwendete Fahrzeugparameter in den Simulationen	A.3
Tabelle A 13-1 Kilometerleistung, Energieverbrauch und Betriebsstunde.....	A.21
Tabelle A 13-2 Jährliche Kilometerleistung, Energieverbrauch und Betriebsstunde.....	A.21
Tabelle A 13-3 Ermittlung der Abschreibung- und Fremdkapitalkosten.....	A.21
Tabelle A 13-4 Berechnung der jährlichen Betriebskosten des BRT-Systems	A.22
Tabelle A 13-5 Berechnung der jährlichen Betriebskosten des OD-Zubringersystems	A.22

Verzeichnis der Bilder

Bild 2-1 Modal Split des Verkehrsaufkommens nach Raumtyp	4
Bild 2-2 Tagesstrecke nach Verkehrsmittel, Pkw-Besitz und Raumtyp	5
Bild 2-3 Darstellung verschiedener Mobility-On-Demand-Systeme.....	7
Bild 2-4 Projekt STIMULATE in Berlin	12
Bild 2-5 Bus-Rapid-Transit 9 de Julio in Buenos Aires, Argentinien	13
Bild 2-6 Unterschied zwischen Trunk-and-Feeder und direktem System	13
Bild 2-7 Wichtige Elementen der Mobilstationen.....	14
Bild 2-8 Switchh-Station am Berliner Tor in Hamburg	15
Bild 3-1 DARP-Algorithmus: Beispielhafter paarweisen Graph	20
Bild 3-2 DARP-Algorithmus: Beispielhafter Fahrten-Graph.....	21
Bild 3-3 DARP-Algorithmus: Simulation des OD-Zubringersystems in SUMO	22
Bild 3-4 DARP-Algorithmus: Speicher- und Zeitkomplexität.....	23
Bild 4-1 Übersichtskarte Untersuchungsgebiet	24
Bild 4-2 Landnutzung und Verkehrsnetz.....	25
Bild 4-3 Bestandssituation B1	27
Bild 4-4 Aufnahmen des Untersuchungsgebiets	27
Bild 4-5 ÖPNV-Angebote.....	28
Bild 4-6 Vorgeschlagenes Trunk-and-Feeder-System	31
Bild 4-7 Abstellanlagen für Scooter.....	33
Bild 4-8 Lageplan Mobilstation Vechelde	35
Bild 4-9 Lageplan Mobilstation Denstorf	37
Bild 4-10 Lageplan Mobilstation Lamme.....	40
Bild 4-11 Beispiele für BRT-Fahrzeuge	42
Bild 4-12 Beispiele für OD-Fahrzeuge	44
Bild 4-13 Buchungsschritte des OD-Zubringersystems.....	45
Bild 4-14 Verkehrsnetz und Umgebungsverkehr.....	48
Bild 4-15 Simulierte tägliche Verkehrsmenge je Richtung.....	49
Bild 4-16 Verläufe der Fahrzeuganzahl über die Zeit in der Simulation.....	49
Bild 4-17 Buslinie 450: Umlaufzeit und ihre Zeit-Komponenten	51
Bild 4-18 Buslinie 450: Fahrzeiten nach Abfahrzeit und Fahrtrichtung	51
Bild 4-19 Buslinie 450: Reisezeit Tür-zu-Tür.....	53
Bild 4-20 Ganglinien der Nachfrage jedes OD-Zubringersystems	56
Bild 4-21 Gammaverteilung ($\alpha=7,5; \beta=0,625$).....	57
Bild 4-22 Anzahl der simulierten Serviceintervalle	58

Bild 4-23 OD-Zubringersystem Vechelde: Kapazitätsanalyse	59
Bild 4-24 OD-Zubringersystem Vechelde: Nutzung von Fahrzeugen	60
Bild 4-25 OD-Zubringersystem Vechelde: Fahrzeit	61
Bild 4-26 OD-Zubringersystem Vechelde: Leistung der gewählten Variante	61
Bild 4-27 OD- Zubringersystem Denstorf: Kapazitätsanalyse	62
Bild 4-28 OD-Zubringersystem Denstorf: Nutzung von Fahrzeugen	63
Bild 4-29 OD-Zubringersystem Denstorf: Fahrzeit	63
Bild 4-30 OD-Zubringersystem Denstorf: Leistung der gewählten Variante	64
Bild 4-31 OD- Zubringersystem Lamme: Kapazitätsanalyse	64
Bild 4-32 OD-Zubringersystem Lamme: Nutzung von Fahrzeugen	65
Bild 4-33 OD-Zubringersystem Lamme: Fahrzeit	65
Bild 4-34 OD-Zubringersystem Lamme: Leistung der gewählten Variante	66
Bild 4-35 BRT-Linie: Umlaufzeit und ihre Zeit-Komponenten	67
Bild 4-36 BRT-Linie: Fahrzeiten nach Abfahrzeit und Fahrtrichtung	68
Bild 4-37 OD-Systeme: Besetzungsgrad (eigene Darstellung)	69
Bild 4-38 Bike+BRT: Reisezeit Tür-zu-Tür	71
Bild 4-39 OD+BRT: Reisezeiten Tür-zu-Tür	72
Bild 4-40 Reisezeiten Tür-zu-Tür mit allen betrachteten Verkehrsmitteln	74
Bild 4-41 Linienverlauf in der Innenstadt	75
Bild 4-42 Konzept für die Optimierung des ÖPNV in der Innenstadt	77
 Bild A 3-1 Verkehrsmenge im Werktagsverkehr in [Kfz/24h]	A.4
Bild A 5-1 Ergebnisse des Programms „Ver_Bau“ für das OD-Zubringersystem Vechelde ..	A.6
Bild A 5-2 Ergebnisse des Programms „Ver_Bau“ für das OD-Zubringersystem Denstorf ..	A.7
Bild A 5-3 Ergebnisse des Programms „Ver_Bau“ für das OD-Zubringersystem Lamme	A.8
Bild A 6-1 Ganglinien der Nachfrage der OD-Zubringersysteme je Ort	A.9
Bild A 7-1 Ganglinien der Anfragen an dem OD-Zubringersystem Vechelde	A.10
Bild A 7-2 Ganglinien der Anfragen an dem OD-Zubringersystems Denstorf	A.11
Bild A 7-3 Ganglinien der Anfragen an dem OD-Zubringersystems Lamme	A.12
Bild A 10-1 OD-Zubringersystem Vechelde: Leistungsmerkmale pro Fahrt	A.15
Bild A 10-2 OD-Zubringersystem Denstorf: Leistungsmerkmale pro Fahrt	A.16
Bild A 10-3 OD-Zubringersystem Lamme: Leistungsmerkmale pro Fahrt	A.17
Bild A 11-1 Liniennetzplan der Stadt Braunschweig	A.18
Bild A 11-2 Personenfahrten im werktäglichen ÖV in [Pers.F./24h]	A.19

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Abo	Abonnement
Afa	Absetzungen für Abnutzung
ABM	Agentenbasierte Modelle
ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V.
ADFC	Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club
AST	Anrufsammeltaxi
AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
A391	Autobahn 391
B+R	Bike+Ride
BV	Braunschweig-Vechelde
Bast	Bundesanstalt für Straßenwesen
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
B1	Bundesstraße 1
VÖB	Bundesverband Öffentlicher Banken Deutschlands
BRT	Bus-Rapid-Transit
DLKG	Deutsche Landeskulturgesellschaft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DARP	Dial-A-Ride-Problem
DES	Diskrete-Ereignis-Simulation
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken
E	Elektro
EAÖ	Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs
EAR	Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs
ERA	Empfehlungen für Radverkehrsanlagen
€	Euro
Fz	Fahrzeug
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
α	Gamma Formparameter (dimensionslos)
β	Gamma inverser Skalenparameter (dimensionslos)
GTFS	General Transit Feed Specification
QGIS	Geoinformationssystem (Ehemals Quantum-GIS)
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs
ITDP	Institute for Transportation and Development
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

kWh	Kilowattstunde
K+R	Kiss+Ride
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Kfz	Kraftfahrzeug
K12	Kreisstraße 12
L475	Landstraße 475
LSA	Lichtsignalanlagen
LP	Lineare Optimierung
MWh	Megawattstunde
MiD	Mobilität in Deutschland
MOD	Mobility-On-Demand
MIV	Motorisierten Individualverkehr
NMIV	Nichtmotorisierte Individualverkehr
ÖPNV	Öffentliche Personennahverkehr
OD	On-Demand
OSM	OpenStreetMap
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
P+R	Park+Ride
Pkw	Personenkraftwagen
Q/Z	Quelle oder Ziel
RE	Regional-Express
Reg-G	Regionalisierungsgesetz
RASt	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen
SUMO	Simulation of Urban Mobility
SUV	Sport Utility Vehicle
NWSIB-NI	Straßeninformationsbank Niedersachsen
Std. bzw. h	Stunde
SD	Systemdynamik-Modell
VB	Vechelde-Braunschweig
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VCD	Verkehrsclub Deutschland
W/T	Wege pro Tag

1 Motivation und Zielsetzung

Die Erfindung des Automobils hat die Mobilität und den Alltag der Menschen weltweit stark verändert. Jahrzehntlang war das Automobil Inbegriff von gesellschaftlicher Teilhabe, Selbstbestimmung und Unabhängigkeit.

Die Flexibilität und Freiheit, die das private Auto verspricht, wird jedoch aufgrund der steigenden Anzahl von Fahrzeugen durch Staus und lange Parkplatzsuchen mehr und mehr eingeschränkt. Im Laufe des 20. Jahrhunderts war in der Stadt- und Regionalplanung, bei der das Automobil der Hauptakteur war, die Verbreiterung von Straßen und die Umwandlung von öffentlichen Flächen in neue Parkplätze zur Lösung dieser Probleme vorgesehen. Diese Maßnahmen haben aber mehr Verkehr induziert, sodass das Problem nur kurzfristig gelöst wurde. Dieser Teufelskreis wiederholte sich immer wieder und führte beispielsweise zur 26-spurigen Autobahn „Katy Freeway“ in den USA und zu zehnmal mehr öffentlichen Parkplätzen als Spielplätzen in Berlin (KLEIN-HITPAß und AICHINGER 2018). Der niedrige Besetzungsgrad des Automobils (1,5 in Deutschland (BMVI 2019)) und die immer größeren Modelle, insbesondere der zunehmende Trend zum Sport Utility Vehicle (SUV), machen das private Fahrzeug gesellschaftlich ineffizient in Bezug auf den Verbrauch an Verkehrsflächen im Verhältnis zur Anzahl der beförderten Personen. Dazu kommt noch die hohe Umweltbelastung durch Emissionen (CO₂, Feinstaub usw.) und Lärm sowie die oft vernachlässigten Umweltschäden bei der Herstellung und dem Recycling von Pkws.

Die Nutzung des privaten Fahrzeuges als Hauptverkehrsmittel konzentriert sich vor allem in ländlichen und peripheren Regionen und macht über 60% des Modal-Split aus (BMVI 2017). Die Gründe dafür sind hauptsächlich ineffiziente ÖPNV-Angebote, die durch indirekte und lange Linienverläufe, lange Warte- und Fahrzeiten, begrenzte Fahrpläne und niedrige Taktfrequenzen gekennzeichnet sind.

In den letzten Jahren haben viele Städte weltweit den Fokus der Regional- und Stadtplanung von dem Automobil zu einer nachhaltigen und am Menschen orientierten Planung umgewandelt. Die Hauptakteure der Mobilität sind nun der ÖPNV und der nichtmotorisierte Individualverkehr (hauptsächlich Fahrräder). Dieses neue Konzept hat das Bild vieler Städte bereits verändert und öffentlichen Raum an die Menschen zurückgegeben. Vorreiter in diesem Aspekt sind Städte wie Amsterdam und Kopenhagen.

Das "Trunk-and-Feeder" Konzept ist eines der wichtigsten Mobilitätskonzepte der neuen Stadtplanung. Das Konzept sieht die Beförderung von Menschen in stark nachgefragten Verbindungen mit effizienten und schnellen ÖPNV-Verkehrslinien vor (Bahn, Tram, Bus-Rapid-Transit), während die weitere Erschließung der Fläche über Zubringersysteme abgewickelt wird. Die zunehmende Digitalisierung stellt eine wichtige Chance für On-Demand

(bedarfsgesteuerte) Zubringersysteme dar, indem die Kunden nun ihre Fahrten bequem und schnell über eine Smartphone-App buchen können.

In dieser Masterarbeit wird ein Trunk-and-Feeder-System als Optimierung des bestehenden ÖPNV in einer ländlichen Region nahe Braunschweig untersucht. Das System sieht vor die bestehende Buslinie durch ein Bus-Rapid-Transit (BRT) System für die stark nachgefragte Verbindung in die Stadt Braunschweig zu ersetzen. Das BRT-System wird durch ein On-Demand (OD) Zubringersystem für die Anbindung der einzelnen Dörfer ergänzt. Die Ergänzung des BRT-Systems mit dem nichtmotorisierten Individualverkehr (NMIV) ist wünschenswert und wird auch berücksichtigt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Analyse der möglichen Implementierung und des theoretischen Potenzials des vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems. Hierfür werden zuerst die vorgeschlagenen Systeme (BRT, OD-Zubringer und NMIV) und deren Mobilitätsschnittpunkte (Mobilstationen) geplant. Dies beinhaltet die Ausgestaltung des Fahr- und Betriebsplans, des Linienvverlaufs bzw. Servicebereiches sowie der Fahrzeuge und Infrastruktur. Darüber hinaus wird eine grobe Kostenschätzung der Realisierung des Vorhabens ausgearbeitet. Anschließend wird das Verbesserungspotenzial des geplanten Trunk-and-Feeder-Systems im Vergleich zum bestehenden ÖPNV mithilfe von Verkehrssimulationen quantitativ abgeschätzt. Ziel dieser Masterarbeit ist es auch, das Bündelungspotenzial, die Kapazität und die Leistung des OD-Zubringersystems zu analysieren. Dafür werden drei Fuhrparkvarianten mit unterschiedlicher Fahrzeuganzahl und Kapazität anhand eines selbst entwickelten Algorithmus untersucht.

In anderen Forschungsarbeiten wurde die Umsetzbarkeit von On-Demand-Systemen für urbane und ländliche Räume bereits untersucht (ALAZZAWI U. A. 2018; BISCHOFF, MACIEJEWSKI, und NAGEL 2017; MÖRNER 2018; SCHMIDT 2018). Die Stärke dieser Systeme ist in diesen Studien erkennbar, wobei das nicht unbedingt für die stark nachgefragten Verbindungen gelten muss. Deswegen ist es von großer Bedeutung die On-Demand-Systeme nur als Zubringer einer BRT-Linie zu betrachten.

Die Masterarbeit gliedert sich wie folgt: Zunächst wird im Kapitel 2 die Mobilitätssituation in den ländlichen Räumen, das Konzept von Mobility-On-Demand (MOD) und Bus-Rapid-Transit (BRT) Systeme anhand aktueller Literatur beschrieben. Danach wird im Kapitel 3 die verwendete Methodik der Verkehrssimulationen und der selbstentwickelte Algorithmus für die Simulation der OD-Zubringersysteme erklärt. Im Kapitel 4 wird die Optimierung der Buslinie 450 in Braunschweig vorgestellt, welche die Beschreibung des Untersuchungsgebiets und die Planung, Simulation und Ergebnisanalyse der vorgeschlagenen Systeme beinhaltet. Schließlich fasst das Kapitel 5 die Hauptmerkmale dieser Arbeit zusammen und es wird ein Ausblick über weitere zukünftige Schritte gegeben.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel werden die für diese Masterarbeit relevanten wissenschaftlichen Grundlagen und Techniken erläutert. Zunächst wird das Thema Mobilität im ländlichen Raum und seine Besonderheiten und Herausforderungen angesprochen. Danach werden die neuen Konzepte von Mobility-On-Demand (MOD) unter besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung als ÖPNV-Zubringer vorgestellt. Schließlich werden die Hauptmerkmale von Bus-Rapid-Transit (BRT) Systemen und Mobilstationen als Mobilitätsschnittpunkte kurz beschrieben.

2.1 Mobilität im ländlichen Raum

Die Definition vom ländlichen Raum ist oft mehrdeutig und hängt davon ab, in welchen Kontext der Begriff benutzt wird (PENKE 2012). Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) klassifiziert als ländliche Regionen alle Städte und Gemeinden, die nicht zu den Stadtregionen gehören, sodass sie auf der großräumigen Betrachtungsebene eine komplementäre „Restkategorie“ zu den Stadtregionen bilden (BMVI 2018b).

Der ländliche Raum ist durch eine geringere Bevölkerungs- und Siedlungsdichte, hohe Anteile landwirtschaftlich genutzter Flächen, vorherrschend niedriggeschossige und aufgelockerte Bebauung und eine höhere Entfernung zu Oberzentren charakterisiert (BMEL 2016). Nach Angaben des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR 2017) wohnten im Jahr 2017 ca. 70% der Bevölkerung in kreisfreien Großstädten bzw. städtischen Kreisen, die flächenmäßig nur ca. 30% des Bundesgebiets ausmachen. In den restlichen 70% der Fläche (ländlichen Kreise) lebten die übrigen 30% der Bevölkerung. Der Anteil der Stadtbevölkerung steigt ca. seit dem Jahr 2000 rasant an und nach einer Prognose wird der Anteil auf 78,6% im Jahr 2030 ansteigen (UN DESA o. J.). Diese Abwanderung erfolgt vor allem von jungen Bevölkerungsteilen und fällt damit mit einem Anstieg des Anteils älterer Menschen im ländlichen Raum zusammen (SCHILCHER 2015).

Infolge dieser Situation und der zunehmenden Motorisierung der Bevölkerung wurde in der Vergangenheit die öffentliche Verwaltung, soziale Infrastruktur, Versorgungs- und Dienstleistungsangebote zentralisiert (SCHÖFL, SCHÖFL, und SPEIDEL 2009). Nach Winkel (2008) sind infolgedessen ganze Versorgungsstrukturen im ländlichen Raum zusammengebrochen.

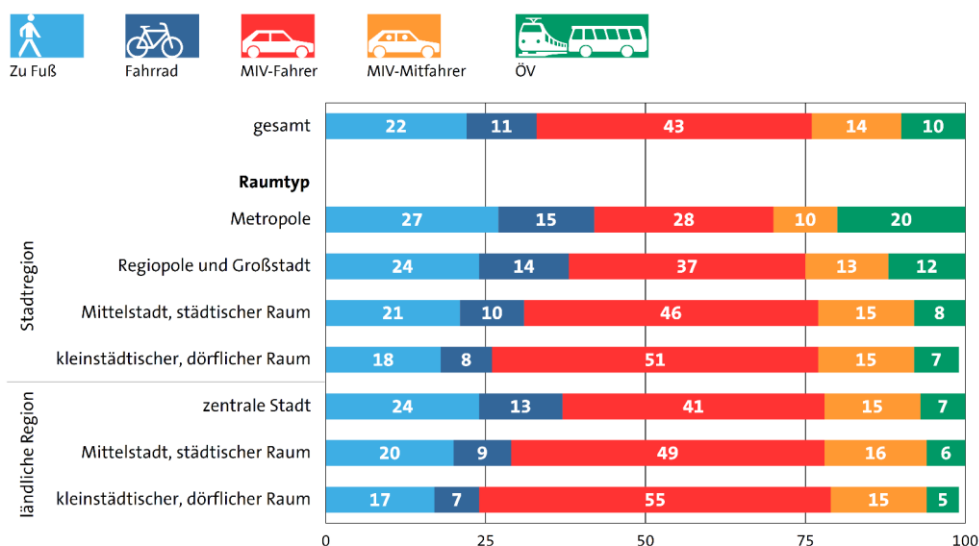
Diese Problematik zeigt sich auch in den ÖPNV-Angeboten. Nach Steinrück und Küpper (2010) nimmt die Anzahl von Orten ohne Anschluss an den ÖPNV bereits zu, während die noch bestehenden ÖPNV-Angebote im ländlichen Raum durch lange Fahrzeiten, unattraktive Taktung und unregelmäßigen Service gekennzeichnet sind. Dies vermindert die Nachfrage und erhöht das Problem der unzureichenden Fahrgeldeinnahme und des geringeren

Deckungsgrades. Die Hauptfunktion des ÖPNV in diesen Regionen besteht laut Canzler (2008) in der Schülerbeförderung mit Anteilen von mehr als 50% in vielen Landkreisen und bis zu 90% in einigen Landkreisen (GATHER, KAGERMEIER, und LANZENDORF 2009).

Die geringe Versorgungsdichte und die dementsprechend langen Entfernungen zu den Nahversorgungsangeboten machen den motorisierten Individualverkehr häufig zur einzigen Alternative von Mobilität in diesen Regionen (DLKG 2009). Dies stellt eine große Herausforderung für die Menschen dar, insbesondere für Schüler und Senioren, die nicht selbst fahren können bzw. dürfen und daher auf die Unterstützung ihrer Familie oder Nachbarschaft angewiesen sind (WOCHNIK U. A. 2015).

Die Situation der Mobilität in den ländlichen Räumen ist in der Studie „Mobilität in Deutschland“ (BMVI 2017) gut erkennbar (siehe Bild 2-1).

Modal Split des Verkehrsaufkommens nach Raumtyp



Angaben in Prozent; alle Wege; Abweichungen von 100%: Rundungsdifferenzen

Bild 2-1 Modal Split des Verkehrsaufkommens nach Raumtyp (aus BMVI 2017)

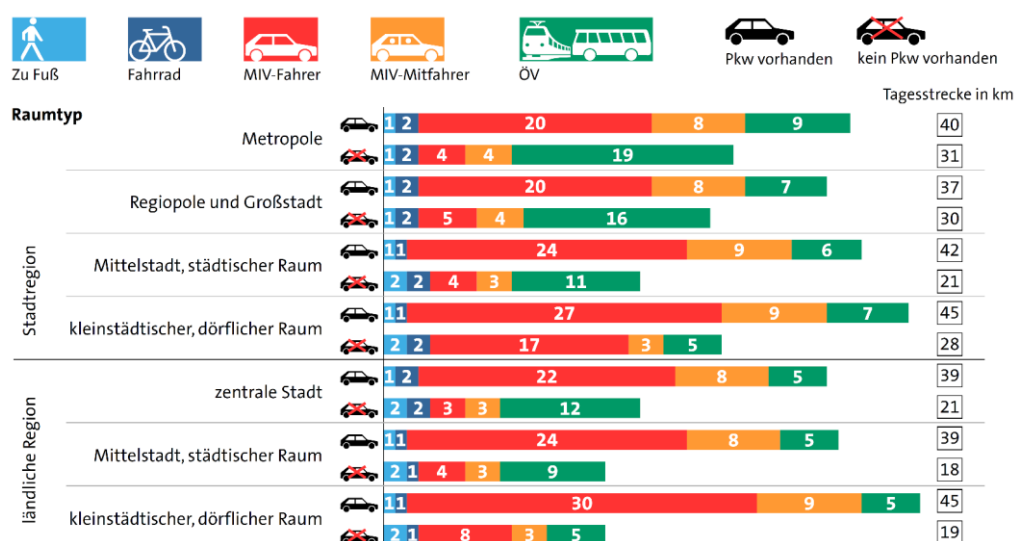
Der ÖPNV-Anteil liegt in allen Kategorien der ländlichen Regionen bei nur 5-7%. Im dörflichen Raum in den Stadtregionen zeigt sich ebenfalls ein sehr niedriger Anteil von 7%. In diesen Raumtypen ist der Anteil vom motorisierten Individualverkehr als Fahrer und Mitfahrer deutlich höher.

Der Anteil des Pkw-Besitzes in ländlichen Regionen liegt bei rund 90% im Kontrast zu 58% in Metropolen und 69% in Regiopolen und Großstädten. Laut dem Bericht führt der Nicht-Besitz eines Autos im ländlichen Raum jedoch nicht zu höheren Strecken mit den öffentlichen Verkehrsmitteln, sondern die Tagesstrecke der Einwohner nimmt stark ab (siehe Bild 2-2).

Mobil zu sein im ländlichen Raum beeinflusst sehr häufig viele Aspekte des Lebens ihrer Bewohner. Insbesondere für Jugendliche führt das geringe Mobilitätsangebot in ländlichen Regionen oftmals zu einer Verringerung der Teilhabechancen an beruflicher Bildung. Die noch

stärker eingeschränkten Mobilitätsangebote zu den Randzeiten und am Wochenende machen die Aufrechterhaltung ihrer sozialen Netzwerke ebenfalls schwieriger (WOCHNIK U. A. 2015).

Tagesstrecke nach Verkehrsmittel, Pkw-Besitz und Raumtyp



Angaben in Kilometer; alle Personen

Bild 2-2 Tagesstrecke nach Verkehrsmittel, Pkw-Besitz und Raumtyp (aus BMVI 2017)

Doch die Gewährleistung der Mobilität aller Bevölkerungsteile ist gesetzlich als Aufgabe der Daseinsvorsorge definiert (§ 1 Abs. 1 Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (Regionalisierungsgesetz–RegG)). Deswegen werden seit den 1970er Jahren verschiedene bedarfsgesteuerte oder flexible Bedienformen des ÖPNV als potenzielle Lösung der Mobilität in den ländlichen Räumen in Deutschland getestet (LÖCKER und FRIEDHELM 1994). Nach Mehlert (2001) unterteilen sich diese in den Bedarfslinienbetrieb (L-Bus), Richtungsbandbetrieb (R-Bus und R-AST) und Flächenbetrieb mit Haustürbedienung (F-Bus und Taxi). Die Unterschiede zwischen den genannten ÖPNV-Angeboten können der Tabelle 2-1 entnommen werden. Die konventionelle Betriebsform ist als Linienbetrieb gekennzeichnet.

Die geeignete flexible Bedienungsform ist von der Größe der Bedienungsgebiete, der Bevölkerungsdichte und der Siedlungsstruktur abhängig (BMVBS und BBR 2009). Im Unterschied zum klassischen Linienverkehr fällt ein hoher Anteil der Kosten nur an, wenn das Angebot tatsächlich genutzt wird (MÖRNER 2018). In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Kosten der flexiblen Angebote aufgrund des Dispositionsaufwands und der in der Regel geringeren Kapazität der Fahrzeuge sogar stärker als im klassischen Linienverkehr steigen können. Dies tritt insbesondere auf, wenn die notwendigen Bündelungs- und Sammeleffekte nicht erreicht werden können oder sich die Fahrten nur auf die Beförderung einzelner Fahrgäste beschränken (BMVI 2016).

Tabelle 2-1 Bedienungsformen im ÖPNV (nach DENNIG und SIEBER 2012)

Betriebsform	Fahrplan	Anmeldung	Zu- und Abgang				Darstellung	
			Haltestelle		Haustür			
			Einst.	Ausst.	Einst.	Ausst.		
Linie	mit	ohne	Linien-Bus					
Bedarfslinie	mit	mit	L-Bus					
Richtungsband	mit	mit	R-Bus*				Linienabweichung	Korridor
			R-AST			R-AST		
Fläche	ohne	mit			F-Bus			
					Taxi			
<div>Einst.: Einstieg und Ausst.: Ausstieg</div> <div>* in Einzelfällen auch Bedienung von abgelegenen Gehöften</div> <div>AST = Anruf-Sammel Taxi</div> <div> Kombination nicht existent</div>								<div> Fest bediente Haltestellen</div> <div> Bedarfshaltestellen</div>

Die zunehmende Digitalisierung stellt in dieser Betrachtung eine Chance für den ÖPNV dar, da sie zur Gestaltung flexibler, preiswerter, umwelt- und kundenfreundlicher Mobilitätsangebote beiträgt (NAGEL U. A. 2018). Services wie flexible Abfahrtszeiten, mögliche Auswahl von Abhol- und Zielpunkten, einfacher Zugriff auf Informationen und Buchungen über eine Smartphone-App sowie kostenloses WLAN an Board haben das Potenzial Neukunden, insbesondere Pendler und Vielfahrer, zu gewinnen.

Eine allgemeine Herausforderung der Digitalisierung besteht in der Nutzung von Daten und im Fall der Mobilität in der Nutzung von ortsbezogenen Daten der Fahrgäste (VCD o. J.). Ein sensibler, professioneller und transparenter Umgang mit den Daten ist aus diesem Grund besonders wichtig. Weitere Herausforderungen der Digitalisierung im Bereich der Mobilität sind zum einen die in einigen Regionen noch begrenzte Netzabdeckung (LOBECK 2017), die nicht nur für den Zugang der Kunden zu Informationen und Buchungen, sondern auch für den Betrieb der ÖPNV-Angebote unerlässlich ist. Zum anderen dürfen Personen ohne ein Smartphone oder ohne das Know-how zur Nutzung einer App nicht per se ausgeschlossen werden. Von dieser Situation ist insbesondere die wichtige ÖPNV-Zielgruppe der Senioren betroffen (AIGNER-BREUSS und BRAUN 2011). In diesem Sinne müssen andere Möglichkeiten, wie z.B. eine telefonische Bestellung, gesichert sein (MEHLERT und KARL 2014).

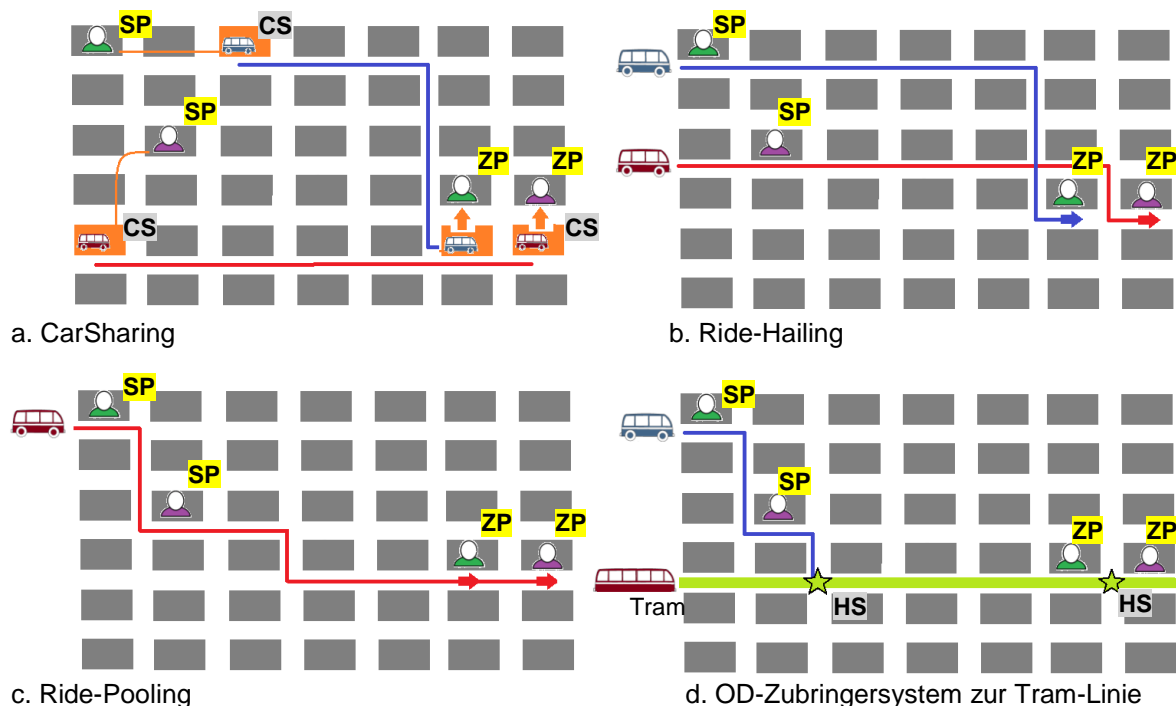
Wie Wochnik (2015) erklärt hat, wird der ÖPNV allein die Mobilitätsprobleme in ländlichen Räumen nicht lösen. Es ist vielmehr ein globales Mobilitätsmanagement notwendig. Dazu gehört u.a. (1) die Vermeidung des Mobilitätsbedarfs durch z.B. Online-Services für Einkauf und Banking, (2) die Erhöhung der Mobilitätsdienstleistungen, d.h. dass Güter und Dienstleistungen wie Ärzte, Bürgerservice und Jugendsozialarbeit direkt zu den Bewohner gebracht werden, anstatt dass diese zu der nächsten Stadt fahren müssen und (3) die

Gewährleistung eines leistungsfähigen Fahrradnetzes mit Fahrradabstellmöglichkeiten an ÖPNV-Haltestellen. Schließlich ist die Bekanntmachung der Angebote und die Beteiligung der Bevölkerung an den Gestaltungsprozessen von großer Bedeutung für die zukünftige Akzeptanz (BMVI 2018a; KÖNIG und GRIPPENKOVEN 2017).

2.2 Mobility-on-Demand

Der Begriff Mobility-on-Demand (MOD) oder Mobilität nach Bedarf beschreibt im Wesentlichen Konzepte der Mobilität, die über keine festen Haltestellen oder Fahrpläne verfügen, sondern auf die aktuellen und individuellen Bedürfnisse der Nutzer reagieren (MELZER und VIERGUTZ 2018).

Die Entwicklung der MOD teilt sich laut Mehlert und Schiefelbusch (2017) in drei Phasen auf: die Phase der Großrechner (1970-1985), die Phase der Personalcomputer (PC) und des Internets (1985-2010) und die Phase des mobilen Internets und der Apps (seit 2010). Seit Anbruch dieser letzten Phase sind neue und vielfältige Mobilitätsangebote und -konzepte entwickelt worden, die einen enormen Aufschwung erlebt haben und bereits in verschiedenen Städten weltweit im Einsatz oder in der Testphase sind. Im Folgenden wird auf die vier wichtigsten Modelle eingegangen: CarSharing, Ride-Hailing, Ride-Pooling und On-Demand-Zubringersysteme. Während die CarSharing-Services die Buchung eines Fahrzeuges ohne Fahrer ermöglichen, sehen die drei restlichen Services die Buchung eines Fahrzeuges mit Fahrer vor. Das Bild 2-3 stellt das Prinzip der genannten MOD-Services dar.



SP: Startpunkt, ZP: Zielpunkt, CS: CarSharing Station und HS: Haltestelle

Bild 2-3 Darstellung verschiedener Mobility-On-Demand-Systeme (eigene Darstellung)

CarSharing (Bild 2-3.a) ist die organisierte, gemeinschaftliche Nutzung von Kraftfahrzeugen. Das Ziel des Carsharings ist der Verzicht auf das private Fahrzeug und somit eine Entlastung des Verkehrs und eine Verminderung der Anzahl an erforderlichen Parkplätzen (PERSCHL und POSCH 2016). Der Service wird zurzeit deutschlandweit an über 750 Standorten in mehrheitlich städtischen Regionen angeboten (BCS 2019). In ländlichen Räumen mit dispersen Siedlungsstrukturen und dementsprechend weniger potenziellen Nutzern sind Carsharing-Services meist unwirtschaftlich (SCHWEIG U. A. 2004).

CarSharing-Systeme werden in zwei verschiedenen Betriebsformen angeboten. Bei stationsbasierten CarSharing-Systemen erfolgen die Abholung sowie Rückgabe des Fahrzeuges an CarSharing-Stationen. Anbieter dieses Modells sind z.B. stadtmobil, cambio, teilAuto, book-n-drive und Flinkster (Tochter der Deutschen Bahn). Stationsunabhängige CarSharing- oder auch Free-Floating-Systeme werden hauptsächlich in großen Städten und von großen Autokonzernen wie Daimler (Car2Go) und BMW (DriveNow) angeboten. Bei diesem Betriebsmodell erfolgt die Abholung und Rückgabe auf öffentlichen und ausgewiesenen Parkplätzen innerhalb des Operationsgebiets (ADAC 2018).

Nach der Studie „Mobilität in Deutschland“ (BMVI 2017) werden CarSharing-Services nur bei einem sehr geringen Anteil der Wege (4% bzw. 1% für Haushalte ohne bzw. mit Auto) und hauptsächlich zum Einkaufen und für Erledigungen genutzt.

Ride-Hailing (Bild 2-3.b) bietet eine effizientere und schnellere Alternative als der konventionelle Taxibetrieb, indem die Fahrten über eine Smartphone-App gebucht und bezahlt werden. Damit kann der Anbieter den Standort des Nutzers erkennen und mithilfe eines Algorithmus aus einer großen Anzahl denjenigen Fahrer auswählen, der am schnellsten und effizientesten den Kunden bedienen kann. Die Fahrten werden direkt und von Tür zu Tür mit einem kilometer- und/oder zeitbasierten Tarif bedient. Beispiele von Ride-Hailing Anbietern sind Uber, MyTaxi und Lyft, welche schon seit einigen Jahren in verschiedenen Städten weltweit operieren.

Verschiedene Umfragen von Ride-Hailing-Kunden in mehreren US-Städten (CLEWLOW und MISHRA 2017; FEIGON und MURPHY 2018; RAYLE U. A. 2016) zeigen, dass unter 10% der Kunden den Service 2-3 Mal pro Woche und unter 6% der Kunden den Service jeden Tag benutzen. Diese Dienste werden hauptsächlich von den jungen Bevölkerungsgruppen und für Freizeitaktivitäten verwendet. Unter den Hauptgründen für die Nutzung von Ride-Hailing-Systemen befinden sich die wegfallende Parkplatzsuche und die Vermeidung von Alkohol am Steuer.

Mit der Erweiterung dieses Service stellt sich die Frage nach den Auswirkungen auf den Verkehr, insbesondere nach dem Modal Split und der Verkehrsbelastung. Den Umfragen zufolge hätten zwischen 50 und 60% der Fahrten mit Ride-Hailing-Systemen überhaupt nicht,

zu Fuß, mit dem Fahrrad oder mit dem ÖPNV stattgefunden. Der Rest der Fahrten wäre mit dem privaten Auto oder dem Taxi zurückgelegt worden.

Die Studie von Clewlow und Mishra (2017) zeigt zudem, dass Ride-Hailing die Nachfrage nach Buslinien um 6% und nach Tramlinien um 3% reduziert hat. Jedoch ergänzt Ride-Hailing den S-Bahn und Regionalzug Nahverkehr und erzeugt so einen Anstieg der Nachfrage um 3%. Eine Studie von Babar und Burtch (2017) liefert ähnliche Ergebnisse, wo sich Ride-Hailing-Systeme positiv auf die Nutzung von direkten und attraktiven ÖPNV-Angeboten wie S-Bahn und U-Bahn auswirken können. Andere Studien haben gezeigt, dass die Gewinnung von Neukunden aus dem Bereich des ÖPNV mit dessen Attraktivität verbunden ist. Je unattraktiver das Angebot ist, z.B. hohe Haltestellendichte (BROWN 2018) und niedrige Taktung (LAVIERI U. A. 2018), desto eher steigen die Kunden auf das neue Angebot um. Laut Rayle et. Al. (2016) hätten 66% der Ride-Hailing-Fahrten mit dem ÖPNV doppelt so lange gedauert.

Mit Bezug auf den Einfluss von Ride-Hailing-Services auf die Verkehrsbelastung kann keine eindeutige Verbindung festgestellt werden. Nach Li et. Al. (2016) reduziert Ride-Hailing die Verkehrsbelastung in städtischen Gebieten deutlich. Hingegen führten Laut Schaller (2017) solche Services zu einer Erhöhung der Verkehrsbelastung, während es laut einer Studie der City of New York (2016) zu keiner wesentlichen Veränderung kommt.

Der Unterschied zwischen Ride-Hailing und **Ride-Pooling** (Bild 2-3.c) liegt darin, dass bei dem letzteren die Fahrten mit anderen Kunden geteilt werden. Infolgedessen ist die Fahrt bei Ride-Pooling nicht immer direkt, sondern die Bedienung anderer Kunden kann zu Abweichungen in der Route und damit zu längeren Fahrzeiten führen. Die Fahrtwünsche der Kunden werden über eine Smartphone-App gestellt und bezahlt und innerhalb eines maximalen Zeitraums in einem definierten Servicegebiet bearbeitet. Ein mathematischer Algorithmus sucht die besten Verbindungen bzw. Routen zwischen Kunden und Fahrzeugen, sodass die Mehrheit der Fahrtwünsche erfüllt werden. Mit der Optimierung der Algorithmen in den letzten Jahren wurden diese Systeme für eine höhere Nachfrage und ein größeres Betriebsgebiet nutzbar.

Ride-Pooling kann in Form eines Tür-zu-Tür-Service angeboten werden, indem Kunden von dem jeweiligen Zuhause zum gewünschten Ziel und/oder umgekehrt befördert werden. Die Bedienung kann sich jedoch auch auf die flexible Ansteuerung bestehender Haltestellen oder virtueller Haltestellen (Haltezonen) beschränken (LU, QUADRIFOGLIO, und PETRELLI 2017). Die Betriebsleistung könnte somit durch effizientere Routen mit weniger Haltestellen verbessert werden, jedoch würde dies auf Kosten des Kunden-Komforts geschehen. Verschiedene Studien haben jedoch gezeigt, dass diese Ziele nicht immer erreicht werden und dass diese Betriebsform nicht immer einen Vorteil gegenüber dem Tür-zu-Tür-Service darstellt (CZIOSKA U. A. 2017; HÄLL, LUNDGREN, und VÄRBRAND 2008; STIGLIC U. A. 2015).

Die Preisberechnung von Ride-Pooling-Systemen umfasst kilometerbasierte, zeitbasierte oder pauschale Preismodelle sowie Mischpreismodelle. Generell sehen private Systeme die

kilometer- oder zeitbasierten Preismodelle mit einem Mindestpreis pro Fahrt vor (VIERGUTZ und BRINKMANN 2018).

Die Mehrheit der Ride-Pooling-Projekte befinden sich aktuell noch in der Pilotprojektphase. Beispiele sind die Deutsche Bahn Tochter ioki (in Frankfurt und Hamburg), die VW-Tochter MOIA (in Hamburg und Hannover), BerlKönig von der BVG (Berliner Verkehrsbetriebe) und CleverShuttle (Daimler) in mehreren deutschen Städten. Bei allen Anbietern erfolgt die Buchung hauptsächlich in Echtzeit und die Fahrzeuge haben normalerweise eine Kapazität von sechs Fahrgästen.

Nach verschiedenen Simulationen führen Ride-Pooling-Services zu Vorteilen im Vergleich zur Ride-Hailing und/oder Taxi-Services, indem der Fuhrpark und Fahrzeugkilometer auf Kosten einer leichten Erhöhung der Fahrzeiten pro Fahrgast deutlich reduziert werden können (BISCHOFF, MACIEJEWSKI, und NAGEL 2017; LOKHANDWALA und CAI 2018; SCHWIETERMAN und SMITH 2018). Der Einfluss auf die Reduzierung von Fahrzeugkilometern und des Verkehrs tritt jedoch nur auf, wenn viele Kunden von autobasierten Verkehrsmitteln und nur wenige vom ÖPNV wechseln. Laut einer Veröffentlichung des Shared-Use Mobility Centers hat bis heute nur New York City genügend Daten über Ride-Pooling-Systeme veröffentlicht, um deren Auswirkungen zu analysieren und bewerten (FEIGON, MURPHY, und MCADAM 2018). Auf Basis der letztgenannten Daten hat eine Studie von Schaller (2018) festgestellt, dass tatsächlich nur 20% der Fahrten geteilt werden, dass die Mehrheit der Kunden aus nicht autobasierten Bereichen (ÖPNV, Fahrrad und zu Fuß) gewonnen wird und dass zu einem großen Anteil der Zeit die Fahrten mit nur einem Fahrgast zurückgelegt werden. Dies führte somit zu einer Erhöhung der Verkehrsbelastung in der Stadt New York.

Die tatsächliche Gewinnung von Fahrgästen aus dem ÖPNV-Bereich oder nichtmotorisierten Individualverkehr stellt einen kritischen Punkt dar, da Ride-Hailing- sowie Ride-Pooling-Systeme nicht gut für stark nachgefragte Verbindungen geeignet sind (MAGEEAN und NELSON 2003). Dazu sind weiterhin ÖPNV-Linienbetriebe wie Bahn, Tram oder Bus-Rapid-Transit (BRT) Systeme wegen ihrer hohen Kapazität am besten geeignet (MÖRNER 2018). Das Konzept von Trunk-and-Feeder verwindet die Vorteile des Linienbetriebs und der On-Demand-Mobilität, indem ein Linienbetrieb mit wenigen Haltestellen und attraktivem Service die stark nachgefragten Verbindungen bedient und die weitere Erschließung der Fläche über **On-Demand-Zubringersysteme** (Bild 2-3.d) abgewickelt wird.

On-Demand-Zubringersysteme funktionieren grundsätzlich wie Ride-Pooling-Systeme, indem sie Fahrten nach Bedarf und mit anderen Fahrgästen verbinden. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass die Zubringersysteme lediglich die Fahrt bis zu einer ÖPNV-Linie bedienen, die die restliche Fahrt zum Ziel abdeckt. Für den Erfolg des Systems muss daher eine nahtlose Verbindung zwischen beiden Systemen gewährleistet werden. Da diese Systeme als weiteres ÖPNV-Angebot gelten, muss weiterhin deren Zugang und Nutzung für alle Menschen möglich

sein. Die Barrierefreiheit wird durch das Fahrzeug und die Buchung für Personen ohne Smartphone durch andere Möglichkeiten wie die telefonische Buchung gewährleistet. Zur Erhöhung der Attraktivität des Systems, insbesondere für Berufspendler und Vielfahrer, sind Vorausbuchungen sowie ein einfacher und mit den anderen ÖPNV-Angeboten kompatibler Tarif vorgesehen. Infolgedessen sind für solche Systeme die Tarifbestimmungen des ÖPNV mit einem Komfortzuschlag empfehlenswert (KOENIG und VIERGUTZ 2017).

Das Pilotprojekt „Reallabor Schorndorf“ ist eines der ersten Praxisbeispiele von On-Demand-Zubringersystemen in Deutschland. Im Jahr 2018 wurden von Freitagmittag bis Sonntagnacht zwei On-Demand-Kleinbusse als Ersatz für zwei bestehende Buslinien in der Kleinstadt Schorndorf erprobt. Der Service diente für Fahrten innerhalb des Ortes sowie für die Verbindung mit den regionalen Zügen, wobei jedoch die Verbindung mit den regionalen Zügen priorisiert wurde. Im Testzeitraum wurden mehr als 10.000 Fahrgäste (mit einem Anteil von 50% von zufrieden bis sehr zufrieden) vom System befördert (GEBHARDT, BROST, und STEINER 2019). Zwei Drittel der Buchungen erfolgten über die Smartphone-App und ein Drittel über den telefonischen Bestellservice. Es wurden über 20.000 Kilometer zurückgelegt und das System führte zu einer Verminderung von 10% der Fahrzeugkilometer, 20% der möglichen Umläufe und über 50% des Kraftstoffverbrauches (DLR 2019).

Im Hinblick auf die technischen Möglichkeiten gehen mittel- und langfristige Szenarien davon aus, dass OD-Systeme durch den Einsatz von autonom fahrenden Fahrzeugen erhebliche Kosten- und Servicevorteile bringen können (HSL 2016; PAVONE 2015). Nach Litman (2019) können schon in den 2020er und 2030er Jahren in vielen Stadtgebieten selbstfahrende Taxis sowie andere OD-Systeme verfügbar sein. Es gibt aber auch kritischere Stimmen, die davon ausgehen, dass die Vorteile der Kosteneinsparungen des Personals (Fahrer) wiederum durch erhöhte Wartungs- und Reinigungskosten dieser Fahrzeuge verloren gehen (BÖSCH U. A. 2018). Trotz der unterschiedlichen Prognosen werden heutzutage Pilotprojekte von OD-Systemen mit autonomen Fahrzeugen weltweit erprobt. Diese Projekte werden aber hauptsächlich in kleinen Gebieten fern vom öffentlichen Straßenraum getestet. Beispiele davon in Deutschland sind STIMULATE (STadtverträgliche Mobilität Unter Nutzung eLektrischer AutomatisierTer Kleinbusse) in Berlin, NAF Bus (Nachfragegesteuerter Autonom Fahrender Bus) in Enge Sand, Sylt und Nordfriesland, TaBuLa (Testzentrum für autonome Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg) und HEAT (Hamburg Electric Autonomous Transportation). Auf dem Bild 2-4 werden die autonomen Fahrzeuge, die seit November 2017 im Rahmen des Projekts STIMULATE auf dem Campus Charité Mitte erprobt werden, gezeigt.

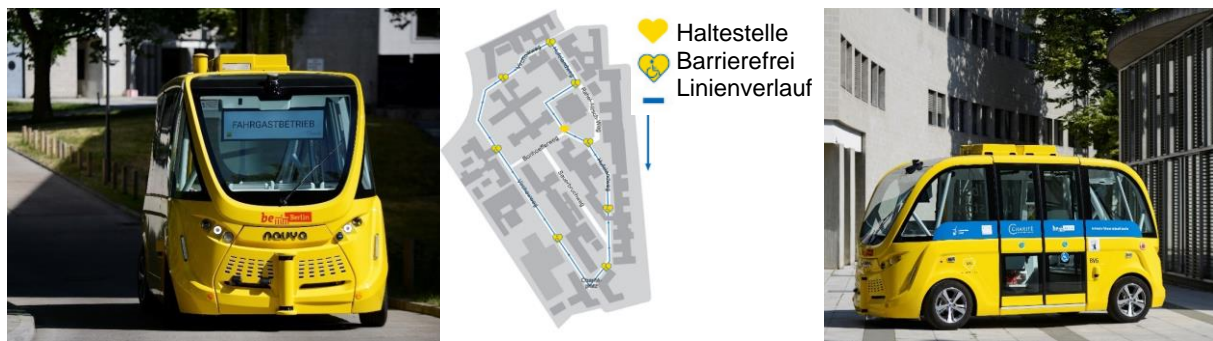


Bild 2-4 Projekt STIMULATE in Berlin (aus STIMULATE 2019)

2.3 Bus-Rapid-Transit

Bus-Rapid-Transit (BRT) ist ein qualitativ hochwertiges busbasiertes öffentliches Verkehrssystem, das durch den Einsatz von spezieller Infrastruktur, attraktiven Betriebs- und Taktzeiten sowie gutem Marketing und Kundenservice schnelle, komfortable und kostengünstige urbane Mobilität bereitstellt (ITDP 2016). Das System wurde in Curitiba (Brasilien) erfunden und im Jahr 2000 mit dem Bau des „Transmilenio“ in Bogotá (Kolumbien) international bekannt. Seitdem wurden viele BRT-Systeme weltweit gebaut und befinden sich heute in Betrieb.

Die BRT-Systeme sind durch die folgenden fünf wesentlichen Merkmale gekennzeichnet:

- **Dedicated right-of-way:** Getrennte Busspuren verhindern Zeitverluste durch Verkehr und Staus;
- **Busway alignment:** Haltestellen und Busspuren sind auf das Zentrum der Fahrbahn ausgerichtet, um Verzögerungen durch abbiegende, geparkte und/oder stehende Fahrzeuge zu vermeiden;
- **Off-board fare collection:** Der Fahrscheinkauf erfolgt vor Reiseantritt, um Verspätungen durch an Bord zahlende Passagiere zu vermeiden;
- **Platform-level boarding:** Das Boarding auf Plattformebene sorgt für ein schnelles und barrierefreies Einsteigen;
- **Intersection treatments:** Abbiegeverbote und ÖPNV-Bevorrechtigung an Knotenpunkte verringern die Wartezeiten vor Signalanlagen.

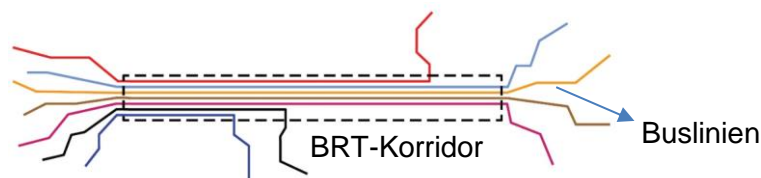
Diese Merkmale können abhängig von dem Projekt in unterschiedlichem Maße übernommen werden. Auf dem Bild 2-5 sind Fotos von dem BRT-System 9 de Julio in Buenos Aires (Argentinien) zu sehen.



Bild 2-5 Bus-Rapid-Transit 9 de Julio in Buenos Aires, Argentinien (aus BUENOS AIRES o. J.)

Der BRT-Korridor 9 de Julio umfasst 3 km und wird von 11 Buslinien benutzt. Die Einrichtung des BRT-Systems führte zu einer Verringerung der Fahrzeiten um bis zu 50% von 255.000 Fahrgästen pro Tag, einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen um 25% bzw. 5.612 Tonnen pro Jahr sowie zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit (BUENOS AIRES o. J.). Solche sowie andere Vorteile z.B. eine erhöhte Nachfrage und Auswirkungen auf die Landentwicklung, wurden für die meisten BRT-Systeme weltweit festgestellt (HERES, JACK, und SALON 2014; LEVINSON U. A. 2003; VINCENT und JERRAM 2006; ZIMMERMAN U. A. 2003). Ein BRT-System kann als direktes System oder als Trunk-and-Feeder-System betrieben werden (siehe Bild 2-6).

Direktes System



Trunk-and-Feeder-System

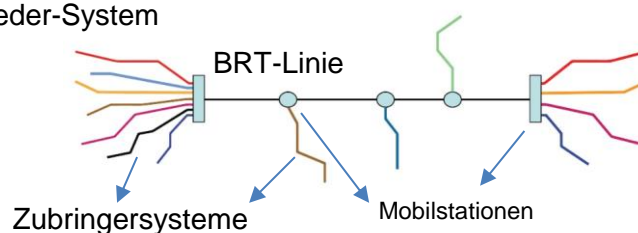


Bild 2-6 Unterschied zwischen Trunk-and-Feeder und direktem System (nach ITDP 2017)

In einem direkten System verkehren mehrere Buslinien innerhalb und außerhalb des BRT-Korridors. Bei dem Trunk-and-Feeder-System wird eine BRT-Linie die stark nachgefragte Verbindung bedienen und die weitere Erschließung der Fläche wird über Zubringersysteme (On-Demand, Shuttle-System, etc.) und mit nichtmotorisiertem Individualverkehr abgewickelt. Die Entscheidung für die jeweilige Ausgestaltung des Systems hängt unter anderem von dem Betriebsgebiet, der Nachfrage und dem Linienverlauf ab (HOOK und WRIGHT 2007). Eine

Kombination von beiden Betriebssystemen (Full-Flex-System) ist in manchen Fällen auch vorgesehen (ITDP 2017).

Trunk-and-Feeder-Systeme können sich besonders für periphere und ländliche Regionen eignen, wo direkte Systeme entweder eine Buslinie mit einem langen und indirekten Linienverlauf durch alle Ortschaften haben müssen oder mehrere Buslinien verkehren müssen.

Bei diesem Betriebssystem ist eine effiziente Gestaltung der Verknüpfungspunkte für einen nahtlosen Übergang zwischen den verschiedenen Mobilitätsdienstleistungen unerlässlich. Diese Verknüpfungspunkte werden unter anderem Mobility-HUB, Mobilitäts-HUB oder Mobilstation genannt und können neben den Mobilitätsdienstleistungen weiteren Angebote wie einen Kiosk oder andere Einkaufsmöglichkeiten, WLAN-Hotspots, Packstationen, usw. beinhalten.

Die wichtigsten Komponenten bei dem Entwurf von Mobilstationen können in fünf verschiedene Kategorien eingeteilt werden: ÖPNV-Einrichtung, Fußgängersicherheit, Fahrradinfrastruktur, motorisierte Serviceangebote sowie Informationen und Services (SANDAG 2017). Das Bild 2-7 listet die genannten fünf Elementen und deren wichtigste Subelemente auf.



Bild 2-7 Wichtige Elementen der Mobilstationen (Eigene Darstellung nach SANDAG 2017)

Die Wahl der Verkehrsangebote und Ausstattungsmerkmale zur Integration in einer bestimmten Mobilstation hängen von ihrem Standort und Servicegebiet ab. Bei dem Aufbau eines städtischen oder regionalen Netzes von Mobilstationen ist die Entwicklung eines hierarchisierten Modulsystems zu empfehlen (ZUKUNFTSNETZ MOBILITÄT NRW 2015).

Auf dem Bild 2-8 ist als Beispiel einer Mobilstation die „Switchh-Station“ am Berliner Tor in Hamburg zu sehen.

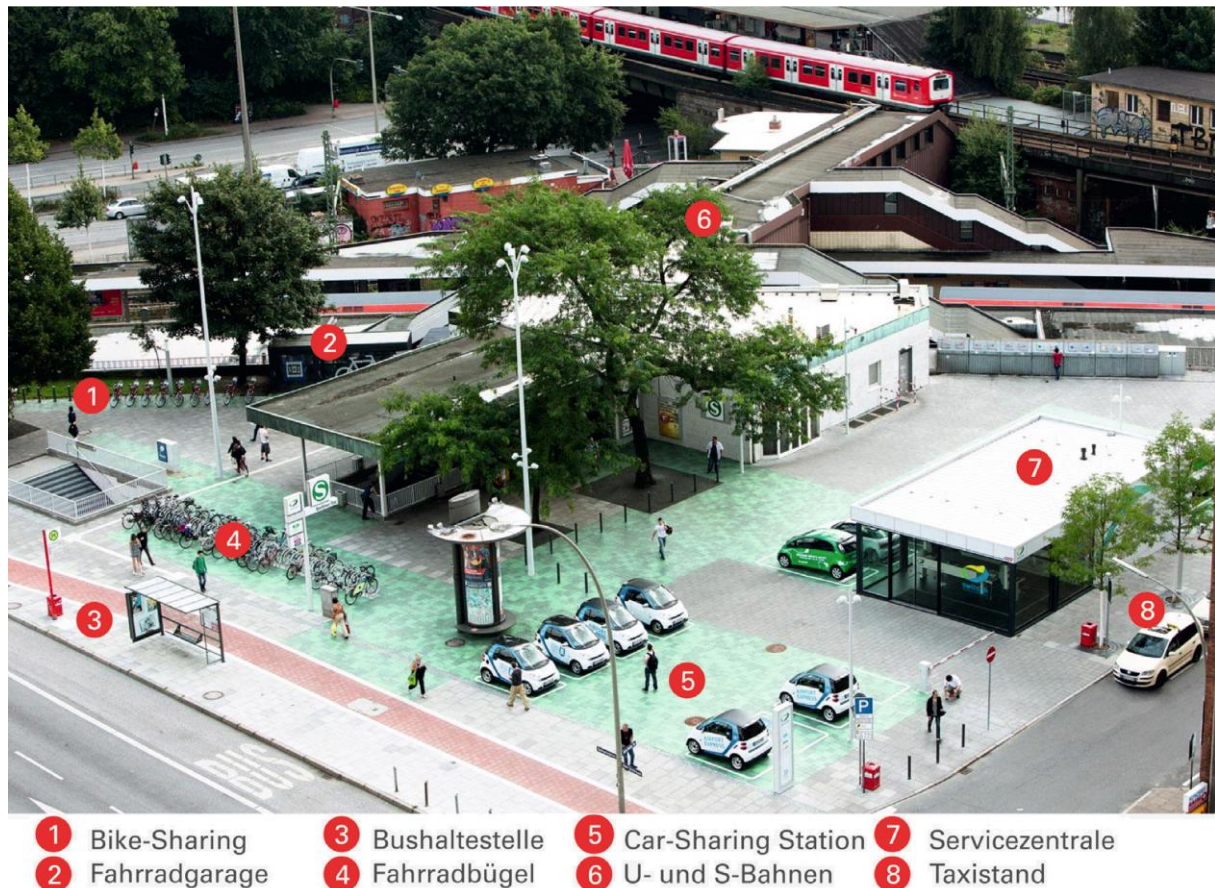


Bild 2-8 Switchh-Station am Berliner Tor in Hamburg (aus LANDESHAUPTSTADT KIEL o. J.)

Wie zu erkennen ist, verfügt jede Mobilitätsdienstleistung über eine definierte Fläche. Dies ermöglicht einen schnellen und nahtlosen Übergang sowie eine Verminderung der Konfliktpunkte.

Das Image der konventionellen ÖPNV-Angebote ist heute zumeist negativ konnotiert. Aus diesem Grund ist eine gute Kommunikation und gutes Marketing neuer und innovativer ÖPNV-Angebote und -Konzepte für deren Erfolg und die Gewinnung von Kunden unerlässlich.

3 Grundlage Verkehrssimulationen

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird die Substitution einer konventionellen Buslinie durch ein Trunk-and-Feeder System untersucht. Dieses gliedert sich in ein Bus-Rapid-Transit (BRT) System und ein On-Demand (OD) Zubringersystem. Die Analyse und Bewertung wird mithilfe von Verkehrssimulationen durchgeführt.

Eine Simulation ist nach der VDI-Richtlinie (VDI 2018) ein Verfahren zur Nachbildung eines realen oder erdachten Systems mit seinen internen dynamischen Prozessen in Form eines experimentierbaren Modells. Aus diesen Modellen können unter bestimmten Voraussetzungen Erkenntnisse erlangt werden, die auf die Realität übertragbar sind. Im Bereich des Verkehrswesens werden Verkehrssimulationen für eine Vielzahl von Zielsetzungen angewendet, welche von der Unterstützung bei der Konzeption neuer Systeme bis zur Bewertung der Auswirkungen alternativer Varianten eines Systems reichen (BARCELÓ 2010). Heutzutage sind Verkehrssimulationen auch ein Schlüsselinstrument bei der Erforschung, Konzeption und Bewertung intelligenter und innovativer Verkehrssysteme.

Das reale Verkehrsgeschehen kann auf verschiedener Weise inhaltlich abstrahiert und damit modelliert werden. Generell werden drei Ebenen unterschieden: Makroskopische, mikroskopische und mesoskopische Verkehrssimulationen.

Makroskopische Modelle betrachten den Verkehrsfluss in Analogie zu einer strömenden Flüssigkeit. Die dynamischen Größen sind lokal aggregierte Größen wie Verkehrsdichte, Verkehrsfluss, mittlere Geschwindigkeit oder Geschwindigkeitsvarianz. Da die Aggregation nur lokal erfolgt, sind diese Größen räumlich und zeitlich variabel. Mikroskopische Modelle oder Fahrzeugfolgemodelle gehen von den einzelnen „Fahrer-Fahrzeug-Teilchen“ aus, die als Kollektiv den Verkehrsstrom ausmachen. Sie beschreiben die Reaktion eines jeden Fahrers (beschleunigen, bremsen, Spur wechseln) in Abhängigkeit von seinen Nachbarn. Die entsprechenden Größen sind die Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Mesoskopische Modelle verknüpfen mikroskopische und makroskopische Ansätze, z.B. indem die Parameter des Mikromodells von makroskopischen Größen wie der Verkehrsdichte abhängen oder makroskopische Größen wie Staubeginn und Stauende durch mikroskopische Ratengleichungen für die ein- und ausfahrenden Fahrzeuge beschrieben werden (TREIBER und KESTING 2010).

In der mikroskopischen Simulation eignen sich besonders agentenbasierte Modelle (ABM). Während traditionelle Modelle wie die Diskrete-Ereignis-Simulation (DES) und das Systemdynamik-Modell (SD) sich auf Prozesse konzentrieren, identifizieren agentenbasierte Modelle aktive Einheiten (Agenten) und definieren ihr Verhalten (METZ 2017). Die globale Dynamik des Systems entsteht dann aus den Interaktionen von vielen einzelnen

Verhaltensweisen. In Verkehrssimulationen stellen die Agenten z.B. Personen, Haushalte und Fahrzeuge dar.

Die Simulation des OD-Zubringersystems erfordert die Abbildung der Prozesse, Anfragen an das System, Routenplanung (Flottenmanagement) und Zuordnung eines Fahrzeuges sowie einzelner Fahrzeuge und Fahrgäste. Dies spricht für einen dynamischen, agentenbasierten Modellierungsansatz. Ziel dieser Masterarbeit ist es nicht, eine vollständige Simulation des Verkehrsflusses umzusetzen, sondern jedes Fahrzeug und jeden Fahrgast des On-Demand-Systems und deren Interaktionen mit den anderen Straßenfahrzeugen zu simulieren. Dies spricht für die Verwendung eines mikroskopischen Verkehrsmodells.

Es stehen mehrere Programme für mikroskopische Verkehrssimulationen zur Verfügung. Zu den bekanntesten Simulationswerkzeugen gehören VISSIM (PTV-Group), Aimsun (Siemens) und Paramics (Systra) und Eclipse SUMO (DLR) (BARCELÓ 2010; KOTUSEVSKI und HAWICK 2009). Die ersten drei sind kommerzielle Programme, während Eclipse SUMO ein kostenloses Open-Source Programm ist. Sowohl diese als auch die meisten anderen Programme bieten jedoch keine Verknüpfungsmöglichkeit zwischen frei agierenden Fahrzeugen und mehreren Passagieren, die diesen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zugewiesen werden sollen (MÖRNER 2018). Deshalb ist die eigene Entwicklung eines Algorithmus zur Simulation der OD-Zubringersysteme erforderlich. Das Programm Eclipse SUMO erweist sich in diesem Zusammenhang als die beste Variante, da dank seiner Open-Source-Lizenz eigene Algorithmen im Programm umgesetzt und getestet werden können.

In der vorliegenden Masterarbeit wurden zusätzlich die folgenden Softwareprogramme verwendet. Die Datenanalyse und die Erstellung der Graphiken wurde mit RStudio durchgeführt (RSTUDIO TEAM 2015). Die Karten wurden auf Basis der Daten von ©OpenStreetMap mit QGIS erstellt (QGIS ENTWICKLUNGSTEAM o. J.). Die 3D-Videos wurden mit Eclipse SUMO (SUMO ENTWICKLUNGSTEAM o. J.) und Blender (BLENDER ONLINE COMMUNITY o. J.) aufbereitet. Alle genannten Programme sind Open-Source und kostenlos. Die Pläne wurden mit AutoCAD® (Studentenlizenz) erstellt.

3.1 Simulation of Urban Mobility (SUMO)

Eclipse SUMO ist ein kostenloses Open-Source-Programm für die multi-modale und mikroskopische Verkehrsflusssimulation und wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt (LOPEZ U. A. 2018). SUMO ist für die Simulation großer Straßennetze ausgelegt und ermöglicht die Modellierung intermodaler Verkehrssysteme einschließlich Straßenfahrzeuge, öffentliche Verkehrsmittel und Fußgänger.

Die mikroskopische Fahrdynamik jedes Fahrzeuges wird durch das Zusammenspiel mehrerer Modelle bestimmt. Das Fahrzeugfolgemodell bestimmt die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges

in Bezug auf das vorausfahrende Fahrzeug (KRAJZEWICZ 2010). Die Fahrspurwahl auf mehrspurigen Fahrbahnen und der Verlauf sowie die Geschwindigkeitsanpassung beim Spurwechsel wird mit einem Spurwechselmodell festgelegt (JAKOB ERDMANN 2014). Zuletzt wird das Verhalten von Fahrzeugen an verschiedenen Arten von Knotenpunkten hinsichtlich der Vorfahrtsregeln mit einem Kreuzungsmodell bestimmt (KRAJZEWICZ und ERDMANN 2013). Zur Modellierung der Fußgänger stehen zwei verschiedene Modelle zur Verfügung (J. ERDMANN und KRAJZEWICZ 2015). Bei dem "nonInteracting" Modell bewegen sich Fußgänger mit konstanter Geschwindigkeit, ignorieren Interaktionen mit anderen Fußgängern und überspringen Kreuzungen. Bei dem zweiten und hier verwendeten "striping" Modell bewegen sich die Fußgänger auf fiktiven Streifen des Gehweges anhängig vom Freiraum vor ihnen. Im Falle des Vorbeikommens einer anderen, langsamer gehenden Person oder bei entgegengesetztem Fußgänger-Verkehr kann der Fußgänger auf einen anderen Streifen wechseln, wenn genügend Platz vorhanden ist. Sowohl Kreuzungen als auch Gehbereiche werden als einfache Gehwege durchlaufen.

Neben der Simulation selbst beinhaltet SUMO weitere Applikationen für die Aufbereitung des Simulationsnetzes sowie der Verkehrsnachfrage und bietet eine Vielzahl von fahrzeugstraßen- und/oder querschnittbasierten Messgrößen wie Fahr- und Verlustzeiten, Routen, Emissionen, Treibstoff- bzw. Batterieverbrauch, etc.

3.2 Der Dial-A-Ride-Algorithmus

Das Fuhrparkmanagement eines On-Demand Verkehrssystems wird häufig als Dial-A-Ride-Problem (DARP) bezeichnet (CZIOSKA U. A. 2017). Das DARP besteht darin, Fahrzeugrouten und Fahrpläne für n Anfragen bzw. Benutzer zu entwerfen, die Fahrtwünsche zwischen einem Start- und Zielpunkt angeben. Ziel ist es, eine Reihe von m kostengünstigen Fahrzeugrouten zu planen, welche so viele Anfragen wie möglich unter bestimmten Bedingungen aufnehmen können (CORDEAU und LAPORTE 2007). Das DARP unterscheidet sich von anderen Routing-Problemen aufgrund des menschlichen Faktors. Bei der Personenbeförderung muss die Verringerung der Unannehmlichkeiten für den Benutzer mit der Minimierung der Betriebskosten in Einklang gebracht werden.

Dial-a-Ride-Services können statisch (offline) oder dynamisch (online) betrieben werden. Im ersten Fall sind alle Anfragen an das System im Voraus bekannt, während im zweiten Fall die Anfragen schrittweise über den Tag erhalten werden und die Fahrzeugrouten in Echtzeit an die Nachfrage angepasst werden.

Zusätzlich zu dieser ersten Klassifikation ergibt sich eine Vielfalt von Varianten des DARP abhängig von den Nebenbedingungen und dem Optimierungsziel. Zu den Nebenbedingungen zählen z.B. die Zeitfenster bei der Abholung der Passagiere, die maximalen Fahrzeiten jedes

Fahrzeuges und die maximalen Umwegfaktoren (Verhältnis im Vergleich zu einer direkten Fahrt). Bei dem Optimierungsziel ergeben sich hauptsächlich zwei Varianten: (i) Minimierung des Fuhrparks unter voller Bedienung der Nachfrage (keine Ablehnung) und Erfüllung der Nebenbedingungen; (ii) Maximierung der Nachfrage (Ablehnung möglich) mit einem bestimmten Fuhrpark (feste Anzahl Fahrzeuge) unter Erfüllung der Nebenbedingungen. Die Methoden zur Lösung des DARP hängen von den Eigenschaften des Problems ab und können zu einer optimalen Lösung (exakte Methode) oder Näherungslösung (Approximationsmethoden) führen.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird ein offline DARP zur Maximierung der Nachfrage unter einem bestimmten Fuhrpark und Nebenbedingungen gelöst. Es wird daher aufgrund einer Reihe von Anfragen von/zu der Mobilstation die beste Route für jedes Fahrzeug des Fuhrparks bestimmt, sodass so viele Anfragen wie möglich bedient werden. Die Anfragen, die nicht bedient werden können, werden abgelehnt.

Der Algorithmus löst mit der Anwendung der exakten Methode von Alonso-Mora et al. (2017) ein DARP für jedes Serviceintervall. Der Algorithmus wurde in der Programmiersprache Python 2.7 geschrieben und ermöglicht die Kopplung mit der Verkehrsflusssimulation Eclipse SUMO für die Ermittlung der Routen.

Als Output wird einerseits ein Kurzbericht (Summary-Datei) mit Information über die Leistung jedes Serviceintervalls erstellt. Dies beinhaltet die Anzahl der erhaltenen bzw. abgelehnten Anfragen, die verwendeten Fahrzeuge sowie die Anzahl der Passagiere und Fahrzeit je Fahrzeug. Zudem werden für jedes Serviceintervall die Routen jedes Fahrzeuges sowie jedes Passagiers im SUMO-Format für ihre direkte Anwendung in weiteren Simulationsszenarien aufgezeichnet.

Der vollständige DARP-Algorithmus befindet sich im digitalen Anhang 1 und lässt sich für andere Szenarien, d.h. andere Verkehrsnetzze, Serviceintervalle, Fuhrparks, etc., anwenden. Im Folgenden werden die Lösungsschritte des Algorithmus erklärt.

1. Eingabedaten:

Für die Berechnungen sind mehrere Daten erforderlich:

- das SUMO-Verkehrsnetz,
- die Kapazität jedes Fahrzeuges,
- die Anfragen mit der gewünschten Abfahrtszeit, und dem Start- und Zielpunkt in dem SUMO-Verkehrsnetz,
- die maximale Fahrzeit jedes Fahrzeuges und
- die Haltezeit für den Ein- bzw. Ausstieg von Fahrgästen.

2. Paarweiser Graph:

Der erste Schritt des Algorithmus besteht darin, einen paarweisen Graph mit allen möglichen Routen zwischen den Fahrzeugen und den Anfragen sowie Routen zwischen zwei Anfragen zu erstellen. Auf dem Bild 3-1 ist ein beispielhafter paarweiser Graph für zwei Fahrzeuge und drei Anfragen dargestellt.

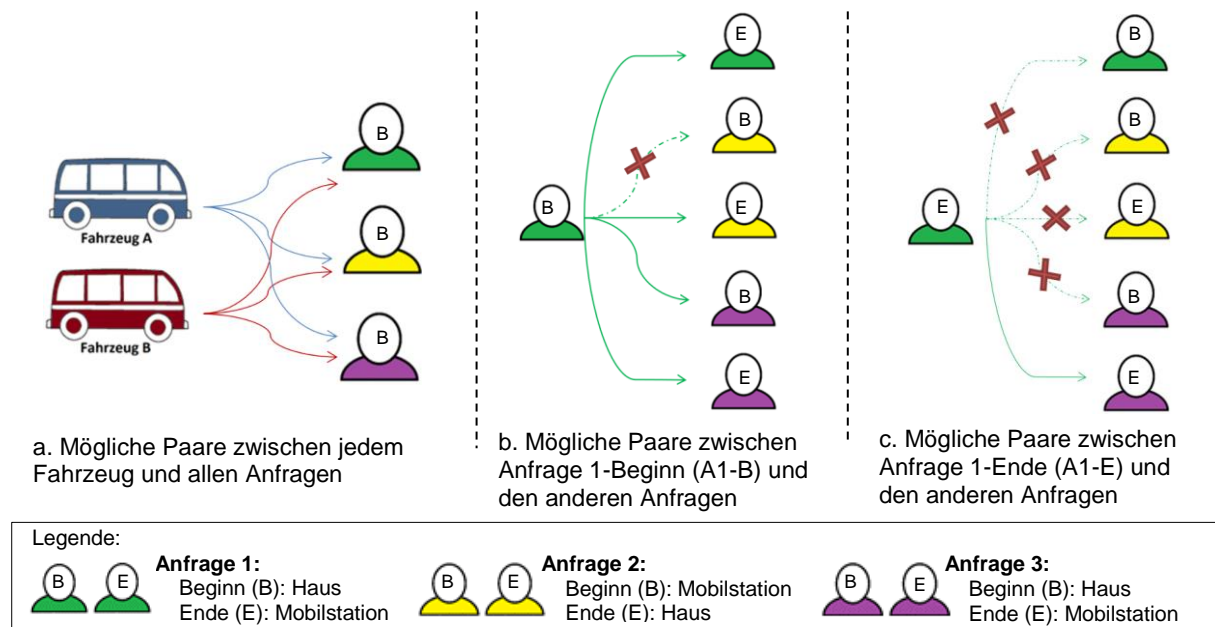


Bild 3-1 DARP-Algorithmus: Beispielhafter paarweisen Graph (Eigene Darstellung)

Wie zu erkennen ist, sind nicht alle Kombinationen gültig. Da die Fahrten immer an der Mobilstation anfangen und enden, werden Anfragen mit einem Anfangspunkt an der Mobilstation als erstens abgeholt. Dementsprechend ist die Kombination Anfrage 1-Beginn (A1-B) und Anfrage 2-Beginn (A2-B) auf dem Bild 3-1.b nicht möglich. Im Bild 3-1.c ist aus dem gleichen Grund nur die Kombination A1-E und A3-E möglich. Diese Prüfung wird für jede Anfrage und jedes Fahrzeug durchgeführt.

Nach der Bestimmung der möglichen Paare wird für jedes Paar die Fahrzeit und der Ein- oder Ausstieg des Passagiers festgelegt. Wenn ein Passagier aussteigt, wird ein Wert von „-1“ genommen. Steigt aber der Passagier ein, dann wird ein Wert von „+1“ gespeichert. Die Fahrzeit besteht aus der Haltezeit und der Fahrzeit des kürzesten Weges, der mithilfe des SUMO-Tools „Duarouter.py“ (LOPEZ U. A. 2018) bestimmt wurde.

3. Fahrten-Graph:

Auf Basis des paarweisen Graphen werden für jedes Fahrzeug alle möglichen Fahrten ermittelt, indem alle möglichen Kombinationen zwischen den Paaren durchlaufen werden. Zwei Paare können verbunden werden, wenn die maximale Fahrzeit sowie die Kapazität des Fahrzeuges nicht überschritten wird. Der Fahrten-Graph wird pro Ebene generiert. Auf dem Bild 3-2 ist als Beispiel der Fahrten-Graph des Fahrzeuges A mit einer Kapazität von zwei Passagieren und einer maximalen Fahrzeit von 15 Minuten dargestellt.

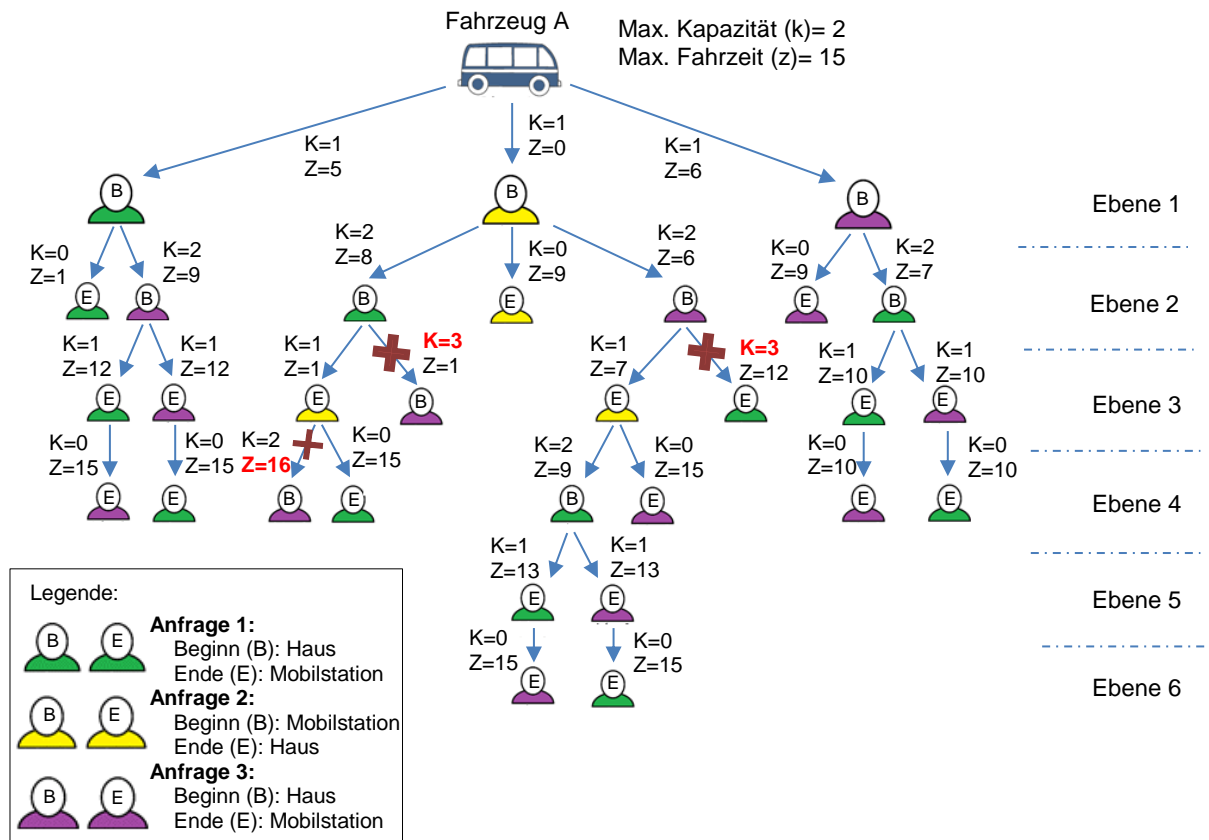


Bild 3-2 DARP-Algorithmus: Beispielhafter Fahrten-Graph (Eigene Darstellung)

Die erste Ebene besteht aus den Paaren aus dem Paarweisen-Graph (Bild 3-1) zwischen dem Fahrzeug und den Anfragen. Als nächster Schritt werden für jeden Knoten die „Kinder“ aus dem Paarweisen-Graph gesucht. Werden die obengenannten Bedingungen (Kapazität und Fahrzeit) erfüllt, dann werden diese als neue Knoten-Kinder hinzugefügt. Anderenfalls wird der Pfad als nicht gültig eingestuft und dementsprechend nicht weiter untersucht (siehe rote Kreuze). Die neue Kapazität und Fahrzeit des Knoten-Kindes entspricht der Summe der vorherigen Knotenpunkte. Dieser Schritt wird für jeden Knoten und jede Ebene wiederholt, bis keine Erweiterung des Graphens mehr möglich ist.

Jeder komplette Pfad des Graphens stellt eine mögliche Fahrt dar, in der der Anfang und das Ende an der Mobilstation liegt, die maximale Fahrzeit sowie Kapazität nicht überschritten wird und alle Passagiere ans Ziel gebracht werden.

Alle möglichen Fahrten werden mit ihrer Fahrzeit und bedienten Anfragen gespeichert.

4. Lösung des linearen Problems:

Der nächste Schritt ist die Bestimmung der optimalen Fahrt bzw. Route für jedes Fahrzeug.

Als Lösungsverfahren wird eine lineare Optimierung - auf Englisch linear programming (LP) - verwendet. Im Folgenden wird das mathematische Problem erklärt.

Eine binäre Variable $\epsilon_{i,j} \in \{0,1\}$ wird für jede mögliche Fahrt $t_i \in T$ jedes Fahrzeuges $v_j \in V$ eingeführt. Wenn $\epsilon_{i,j} = 1$, dann wird das Fahrzeug v_j der Fahrt t_i zugeordnet. Eine zusätzliche

binäre Variable $\chi_k \in \{0,1\}$ wird für jede Anfrage $r_k \in R$ definiert. Wenn eine Anfrage r_k von keinem Fahrzeug bedient werden kann und ignoriert wird, wird die Variable $\chi_k = 1$. Die Anzahl der bedienten Anfragen in jeder Fahrt $\epsilon_{i,j}$ wird als r_b bezeichnet.

Drei Kostenpunkte werden berücksichtigt. Der Kostenpunkt $c_{i,j}$ ist die ermittelte Fahrzeit (Haltezeiten enthalten) für die Fahrt t_i mit dem Fahrzeug v_j . Der Kostenpunkt c_{ko} ist eine große Konstante, um die Ablehnung von Anfragen zu bestrafen. Zuletzt wird ein konstanter und kleiner Kostenpunkt c_b eingeführt, um die Anwendung mehrerer Fahrzeuge zu vermeiden, wenn die Anfragen mit vergleichbaren Kosten mit weniger Fahrzeugen bedient werden können. Die zu minimieren Kostenfunktion $\mathcal{C}(\epsilon, \chi)$ beträgt:

$$\min \{ \mathcal{C}(\epsilon, \chi) = \sum_{i,j} [c_{i,j} + (r_b + 1) \times c_b] \times \epsilon_{i,j} + \sum_k c_{ko} \times \chi_k \} \quad (3-1)$$

Es gibt zwei Arten von linearen Nebenbedingungen:

$$\sum_i \epsilon_{i,j} \leq 1 \quad \forall v_j \in V \quad (3-2)$$

$$\sum_{i,j,k} \epsilon_{i,j} + \chi_k = 1 \quad \forall r_k \in R \quad (3-3)$$

Die Gleichung (3-2) stellt sicher, dass jedes Fahrzeug höchstens für eine Fahrt verwendet wird, während die Gleichung (3-3) sicherstellt, dass jede Anfrage entweder nur einem Fahrzeug zugeordnet oder ignoriert wird.

Diese lineare Optimierung wird mithilfe des Python-Tools „Pulp“ (MITCHELL, OSULLIVAN, und DUNNING 2011) gelöst. Als Ergebnis werden die optimalen Fahrten für jedes Fahrzeug festgelegt.

5. Ausgabedateien:

Als letzter Schritt werden dann die Output-Dateien im xml-Format generiert. Der Kurzbericht mit Information über die Leistung jedes Serviceintervalls hilft bei der Analyse des OD-Zubringersystems. Die Output-Datei mit den SUMO-Routen jedes Fahrzeuges sowie jedes Passagiers ermöglicht die Visualisierung des Systems und ihre Einbindung in andere SUMO-Szenarien. Auf dem Bild 3-3 ist eine Aufnahme einer Simulation des Systems in SUMO zu sehen.

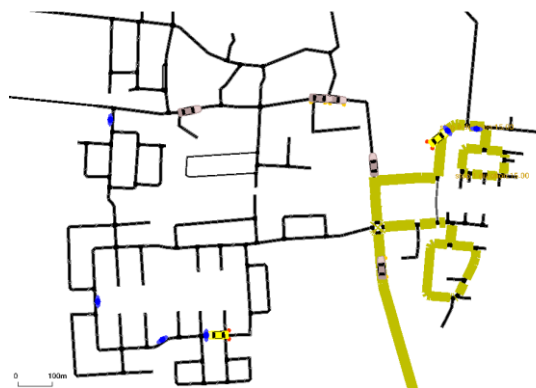


Bild 3-3 DARP-Algorithmus: Simulation des OD-Zubringersystems in SUMO (eigene Aufnahme)

In diesem Beispiel hat das OD-Zubringersystem Lamme einen Fuhrpark von zwei Fahrzeugen (in Gelb) und es werden zehn Anfragen bzw. Nutzer (in Blau) bedient. Die gelben Straßen auf dem Bild zeigen die Route eines OD-Fahrzeuges.

Die Leistung des Algorithmus hängt sehr stark von der Anzahl der Anfragen ab (siehe Bild 3-4). Bis acht Anfragen hat der Algorithmus eine Speicher- und Zeitkomplexität (Simulationszeit) von unter 100 MB bzw. unter einer Minute.

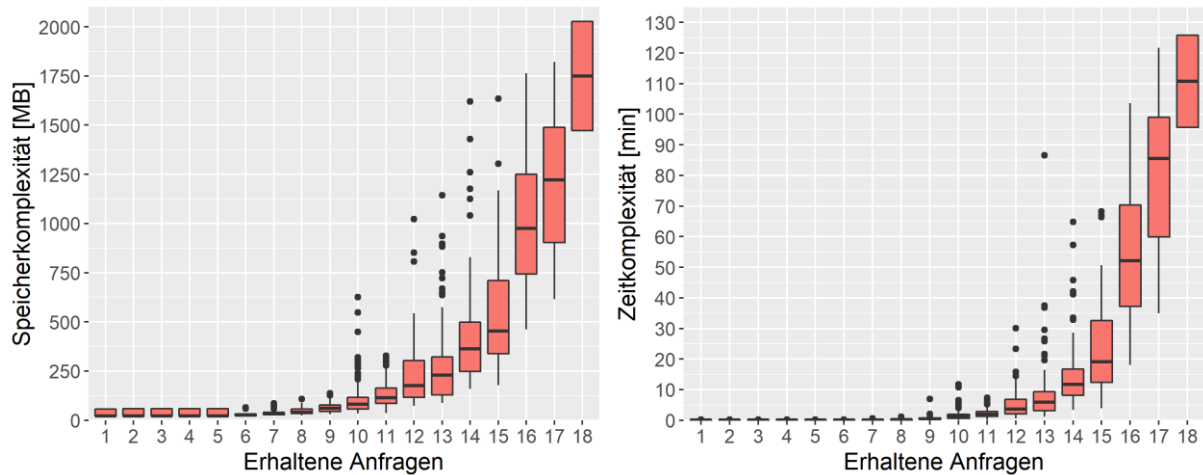


Bild 3-4 DARP-Algorithmus: Speicher- und Zeitkomplexität (eigene Darstellung)

Ab 11 Anfragen steigen beide Leistungsmerkmale rasant an, wobei bei 18 Anfragen die durchschnittlichen Werte bei 1,7 GB und fast zwei Stunden liegen. Der Grund dafür ist der sehr starke Anstieg der Anzahl der möglichen Fahrten.

4 Fallstudie Braunschweig

Im vorliegenden Kapitel wird die Optimierung der Buslinie 450 in Braunschweig durchgeführt. Zunächst wird im Unterkapitel 4.1 das Untersuchungsgebiet und insbesondere die aktuellen und zukünftigen Mobilitätsprobleme beschrieben. Danach folgt im Unterkapitel 4.2 die Planung des vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems zur Optimierung des ÖPNV-Angebots in dem Untersuchungsgebiet. Um die Verbesserungen quantitativ einzuschätzen, werden im Unterkapitel 4.3 die Verkehrssimulationen durchgeführt. Außerdem wird die Leistung der On-Demand (OD) Zubringersysteme mit verschiedenen Fuhrparkvarianten analysiert. Im Unterkapitel 4.4 wird das Optimierungspotenzial des ÖPNV in der Innenstadt Braunschweig untersucht und ein Konzept zur Optimierung vorgeschlagen. Schließlich wird im Unterkapitel 4.5 das Betriebsprogramm und die Kostenschätzung durchgeführt.

4.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Orte westlich der Stadt Braunschweig entlang der Bundesstraße B1: Vechelde, Wahle, Vechelade, Wedtlenstedt, Denstorf, Klein Gleidigen und Lamme (siehe Bild 4-1).

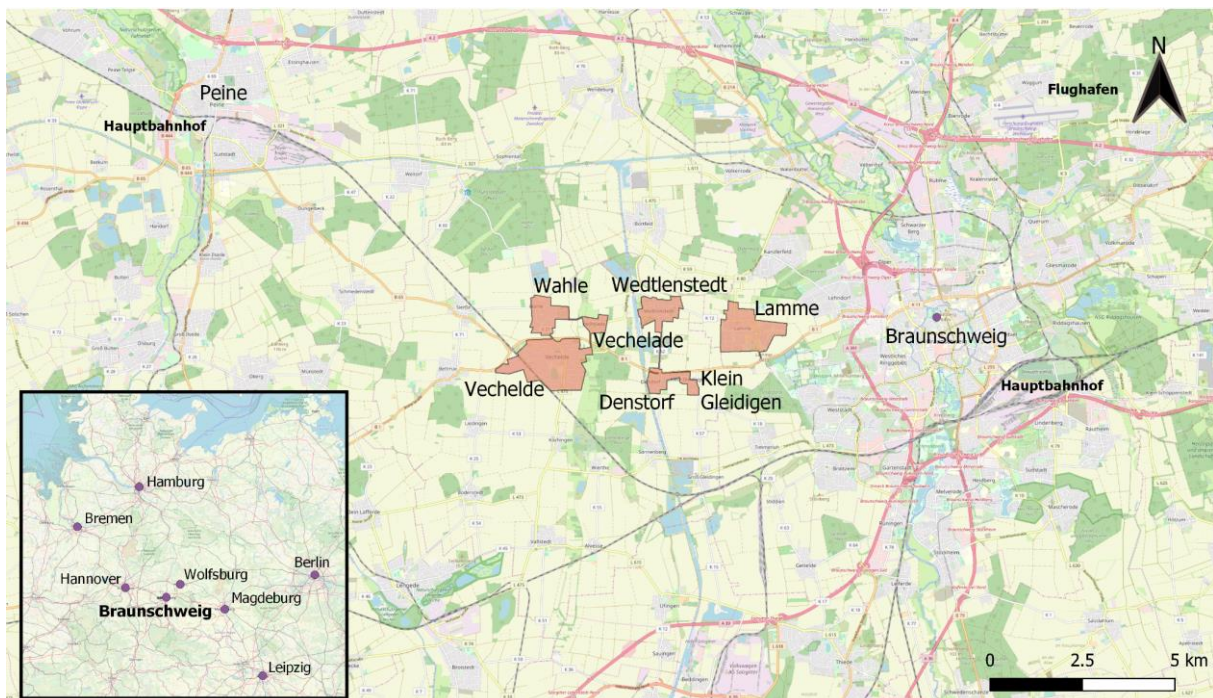


Bild 4-1 Übersichtskarte Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung auf Basis von ©OpenStreetMap)

Die Stadt Braunschweig ist mit 250.361 Einwohnern (STADT BRAUNSCHWEIG 2017a) die zweitgrößte Stadt des Landes Niedersachsen nach seiner Hauptstadt Hannover. Die

nahegelegenen Großstädte sind Hannover ca. 70 km nordwestlich und Wolfsburg, Hauptsitz von Volkswagen, ca. 37 km nordöstlich.

Lamme befindet sich ca. 7 km von der Innenstadt Braunschweig entfernt und liegt unter dessen Einflussgebiet. Die anderen Untersuchungsorte gehören zur Gemeinde Vechelde, Landkreis Peine. Die Entfernung zwischen Vechelde und der Innenstadt Braunschweig beträgt ca. 13 km.

Die Einwohnerzahl der Untersuchungsorte ist unterschiedlich. Vechelde ist mit 6.108 der am meisten besiedelte Ort, gefolgt von Lamme mit 4.930, Wedtlenstedt 1.769, Wahle 1.437, Denstorf und Klein Gleidigen mit 1.329 zusammen und Vechelade mit nur 552 Einwohnern (GEMEINDE VECELDE 2019a; STADT BRAUNSCHWEIG 2017a).

Der größte Teil der Fläche ist für die Wohn- und Mischnutzung vorgesehen, wobei die Mehrheit der Fläche bereits bebaut ist (siehe Bild 4-2). Gewerbegebiete befinden sich hauptsächlich in Vechelde und dort haben bereits einige Betriebe ihren Standort.

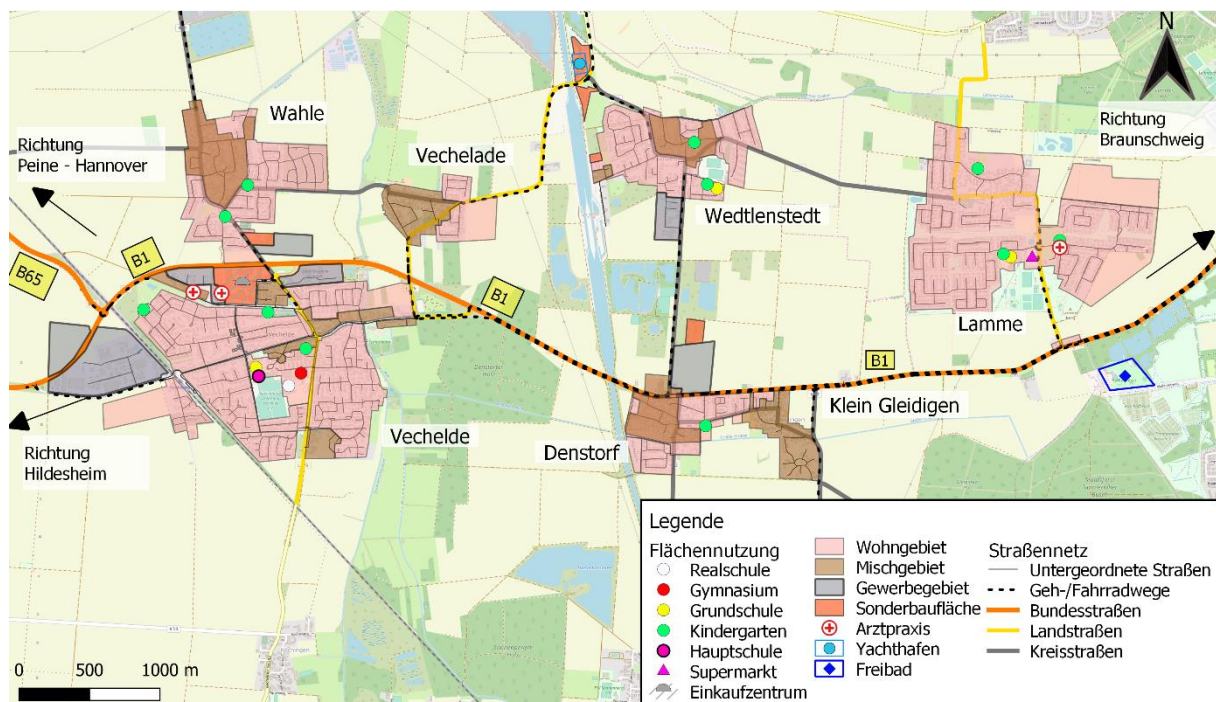


Bild 4-2 Landnutzung und Verkehrsnetz (eigene Darstellung auf Basis von ©OpenStreetMap)

Die Anzahl der Arbeitsplätze im Untersuchungsgebiet ist kleiner als die der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten, was zu einem negativen Pendlersaldo führt. Laut GEWOS (2016) leben und arbeiten weniger als 10% der Einwohner der Gemeinde Vechelde am selben Ort, während 48% nach Braunschweig zur Arbeit pendeln.

Das Bedürfnis nach Mobilität nimmt auch aufgrund des begrenzten Angebots an z.B. Bildung, Nah- und Gesundheitsversorgung, Freizeitaktivitäten zu. Wie auf dem Bild 4-2 zu sehen ist, verfügt nur Vechelde über ein Einkaufszentrum mit verschiedenen Supermärkten (Lidl, ALDI, REWE, Penny), Apotheken, Parfümerien und anderen Geschäften. In Lamme gibt es nur einen

Supermarkt (Netto), während die anderen Dörfer über gar keine Nahversorgungsangebote verfügen.

Ein ähnliches Bild stellt die Gesundheitsleistung dar. Arztpraxen mit unterschiedlichen Fachrichtungen befinden sich nur in Vechelde, während es in Lamme nur eine Allgemeinarztpraxis gibt. Die nächstgelegenen Gesundheitszentren und Krankenhäuser befinden sich in der Stadt Braunschweig.

Hinsichtlich der Bildungseinrichtungen gibt es an allen Orten Kindergärten und Grundschulen. Die Sekundarstufe wird nur in Vechelde mit Hauptschule, Realschule und Gymnasium angeboten. Der tertiäre Bildungsbereich wird nur in der Stadt Braunschweig angeboten.

Obwohl es in allen Orten Freizeitaktivitäten und Sporteinrichtungen gibt, ist die Angebotsvielfalt begrenzt. Besonderheiten des Angebots sind der Yachthafen in Wedtlenstedt, die Schwimmhalle in Vechelde und das Freibad Raffteich südlich der Kreuzung der B1 mit der L638 (Einfahrt nach Lamme).

Dieser Situation entsprechend ist das Mobilitätsbedürfnis der Einwohner des Untersuchungsgebiets hoch und für die meisten Zwecke ist eine Fahrt nach Vechelde oder Braunschweig erforderlich.

4.1.1 Verkehrsinfrastruktur

Das Bild 4-2 stellt die relevanten Merkmale des Verkehrsnetzes dar. Die Untersuchungsorte befinden sich an beiden Seiten der Bundesstraße B1, die als schnellste Zufahrt nach Braunschweig gilt. Die B1 hat einen zweistreifigen Querschnitt (siehe Bild 4-3) mit Höchstgeschwindigkeitsbegrenzungen von 100 km/h außerhalb geschlossener Ortschaften und 50 km/h innerhalb der Ortschaften. Der Abschnitt Vechelde-Braunschweig hat fünf Kreuzungen, von denen nur eine (Lamme) mit einer Lichtsignalanlage ausgestattet ist. Bezüglich der Verkehrsstärke sind nach Angaben der NWSIB-NI (Straßeninformationsbank Niedersachsen) drei Teilstrecken zu unterscheiden: Die Strecke zwischen der Bundesstraße B65 und der Landstraße L475 mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr von 9.300 Kfz/24h (5,9% Schwerverkehr), die Strecke bis zur Kreisstraße K57 mit 14.200 Kfz/24h (3,7% Schwerverkehr) und die Strecke bis zur Autobahn A391 mit 15.600 Kfz/h (3,2% Schwerverkehr). Die Daten stammen aus der letzten Straßenverkehrszählungen aus dem Jahr 2015. (NWSIB-NI o. J.)

Die Verbindung zwischen den Orten erfolgt durch Land- bzw. Kreisstraßen mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeitsbegrenzungen. Das Straßennetz innerhalb der Ortschaften besteht aus einigen Hauptstraßen mit einer Höchstgeschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h und aus Tempo-30-Zonen.

Bezüglich des Fahrradnetzes ist die Bundesstraße B1 zwischen Vechelde (Hildesheimer Str.) und Braunschweig mit einem gemeinsamen Geh-/Radwegen (Breite jeweils ca. 2,00 m) zu beiden Seiten versehen (siehe Bild 4-3).

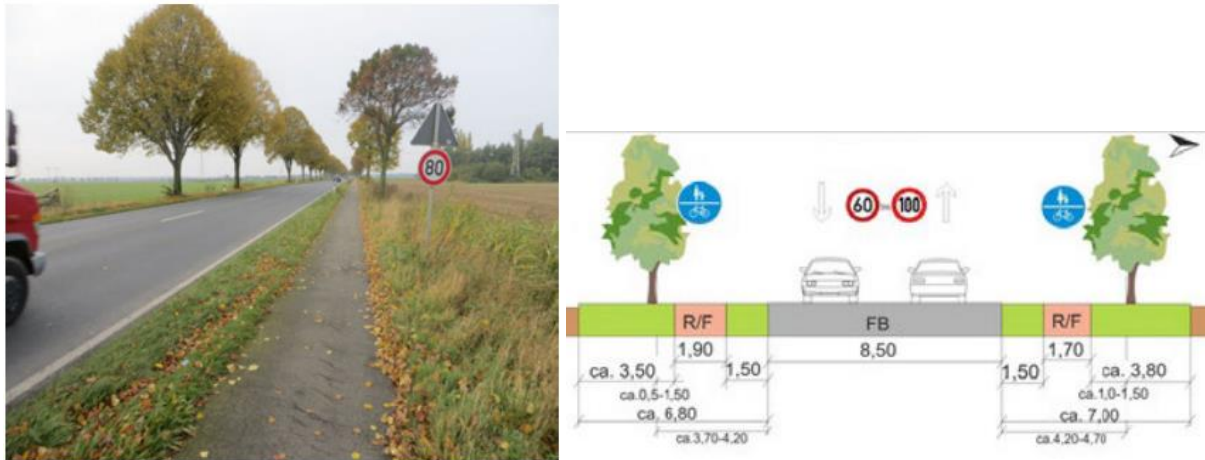


Bild 4-3 Bestandssituation B1 (aus REGIONALVERBAND GROßRAUM BRAUNSCHWEIG 2017)

Die Land- und Kreisstraßen des Untersuchungsgebiets zeigen in der Mehrheit der Fälle einen gemeinsamen Geh-/Radweg zu einer Seite. Ausnahmen ohne vorhandene Radwege sind der Vechelader Weg, der Wahle und Vechelade verbindet, und die Kreisstraße K58/K12, zwischen Wedtlenstedt und Lamme. Innerhalb der Ortschaften ist der Radverkehr mit dem Kfz-Verkehr zusammengeführt. Auf dem Bild 4-4 sind beispielhafte Fotos von den Ortschaften zu sehen.



a. Vechelade

b. Lamme



c. Vechelde

d. Denstorf

Bild 4-4 Aufnahmen des Untersuchungsgebiets (a. aus TEWEBs 2014; b. aus BESSEL 2017; c. aus JAW 2016; d. aus KIRCHENGEMEINDE DENSTORF o. J.)

4.1.2 Verkehrsangebot

Das ÖPNV-Angebot im Untersuchungsgebiet ist eingeschränkt (siehe Bild 4-5). Nur Vechelde verfügt über Angebote des Schienenverkehrs durch die Regional-Express-Linien RE60 „Braunschweig-Hannover-Minden-Osnabrück-Rheine“ und RE70 „Braunschweig-Hannover-Minden-Herford-Bielefeld“ (schwarz gestrichelte Linie). Die Züge verkehren an Werktagen im Stundentakt zwischen 4:30 und 23:30 Uhr. Die Fahrzeit nach Paine beträgt sieben Minuten, nach Braunschweig 10 Minuten und nach Hannover 30 Minuten. Die vollständigen Fahrpläne und Informationen können auf der Website der Westfalen Bahn eingesehen werden (WESTFALEN BAHN o. J.).

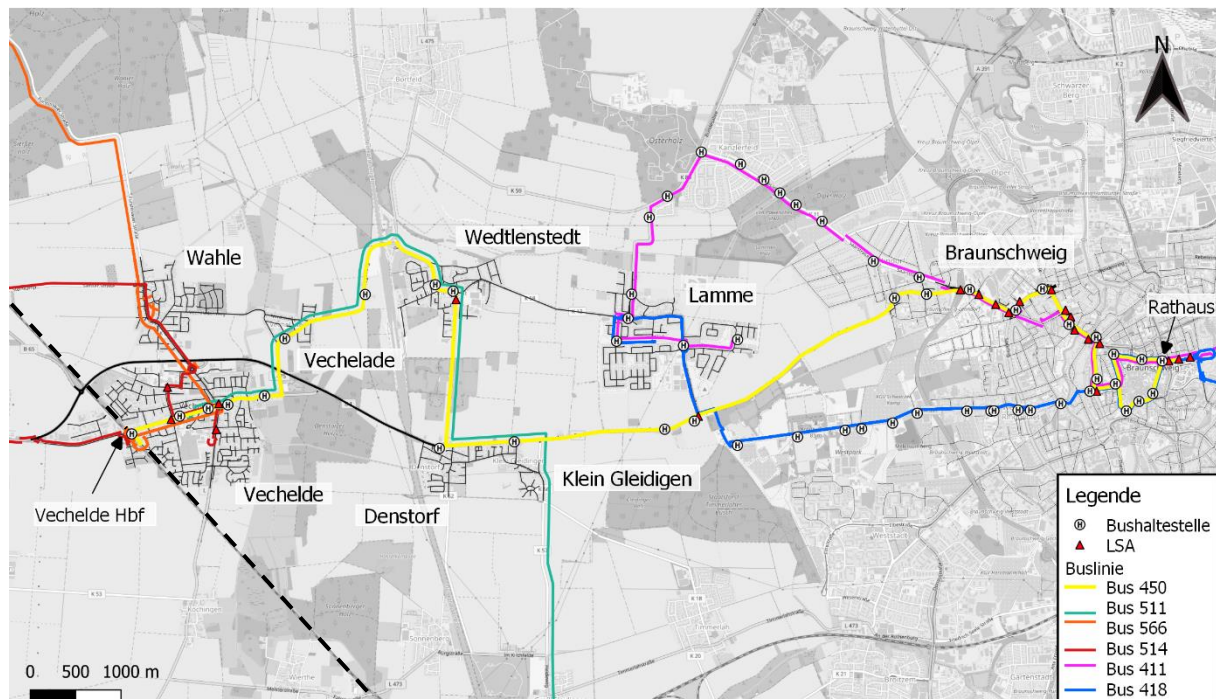


Bild 4-5 ÖPNV-Angebote (eigene Darstellung auf Basis von ©OpenStreetMap)

Die Buslinie 450 „Vechelde-Rathaus Braunschweig“ (gelbe Linie) stellt das wichtigste ÖPNV-Angebot des Gebiets dar. Es ist die einzige ÖPNV-Verbindung von Vechelde, Vechelade, Wedtlenstedt, Denstorf und Klein Gleidigen nach Braunschweig. Die Busse verkehren werktags zwischen 5:00 und 19:30 Uhr im 30 Minuten Takt und bis 22:00 Uhr im Stundentakt. An Wochenenden und Feiertagen hat die Linie auch tagsüber einen Stundentakt. Freitags- und Samstagsabends ist das Angebot bis 3:00 Uhr im Stundentakt erweitert. Die Hin- sowie die Rückfahrt umfasst gemäß dem Fahrplan 26 Haltestellen und 34 Minuten Fahrzeit.

Die Buslinie 511 „Groß Gleidigen-Wedtlenstedt-Vechelde“ (grüne Linie) verkehrt nur an Schultagen und zu bestimmten Uhrzeiten, da die Linie hauptsächlich für Fahrten zu den Sekundarschulen in Vechelde dient. Die Buslinien 514 „Peine/Vechelde-Bettmar-Vechelde“ (rote Linie) und das Anruf-Linien-Taxi 566 „Vechelde-Wahle-Zweidorf“ (orange Linie) verbinden Vechelde mit anderen Gemeindeorten.

Lamme verfügt über die Buslinien 411 „Lamme-Kanzlerfeld-Rathaus-Hbf-Südstadt-Mascherode“ (rosa Linie) und 418 „Lamme-Raffteich-Westpark-Rathaus-Stadtpark-Riddagshausen“ (blaue Linie), welche Lamme über die Innenstadt mit dem südlichen Teil der Stadt bzw. dem östlichen Teil der Stadt verbindet. Die Linie 411 verkehrt an Werktagen zwischen 5:00 und 19:00 Uhr im 15 Minuten Takt und von 19:00 bis 23:30 Uhr im 30 Minuten Takt. An Wochenenden und Feiertagen hat die Linie tagsüber einen 30 Minuten Takt und einen Nachtbetrieb bis 3:00 Uhr im Stundentakt. Die Fahrstrecke bis zum Rathaus umfasst 26 Haltestellen und 35 Minuten Fahrzeit. Die Linie 418 bietet einen eingeschränkteren Service, der nur werktags zwischen 7:00 und 19:00 Uhr und samstags zwischen 9:00 und 19:00 Uhr im 30 Minuten Takt verkehrt. Die Fahrstrecke bis zum Rathaus umfasst 19 Haltestellen und 20 Minuten Fahrzeit.

Wahle verfügt über keine direkte ÖPNV-Verbindung mit der Stadt Braunschweig.

Die Tabelle 4-1 fasst die Informationen der drei Buslinien zusammen, die die Ortschaften des Untersuchungsgebiets mit der Stadt Braunschweig verbinden.

Tabelle 4-1 Bestehende Buslinien zwischen dem Untersuchungsgebiet und Braunschweig

Buslinie	Orten	Betriebszeit und Taktfrequenz	Fahrzeit Hin- bzw. Rückfahrt
450	Vechelde, Vechelade, Wedtlenstedt, Denstorf und Klein Gleidigen	Von 5:00 bis 19:30 Uhr im 30 Minuten-Takt Von 19:30 bis 22:00 Uhr im Stundentakt Sonntags im Stundentakt Nachtbetrieb am Wochenende bis 3:00 Uhr	34 Minuten
411	Lamme	Von 5:00 bis 19:00 Uhr im 15 Minuten-Takt Von 19:00 bis 23:30 Uhr im 30 Minuten-Takt Nachtbetrieb und So. im Stundentakt Nachtbetrieb am Wochenende bis 3:00 Uhr	35 Minuten
418	Lamme	Mo. bis Sa. von 7:00 bis 19:00 Uhr im 30 Minuten-Takt	20 Minuten

Die Fahrpläne und weitere Informationen über jede Linie befinden sich auf der Website der Braunschweiger Verkehrs-GmbH. (BRAUNSCHWEIGER VERKEHRS-GMBH o. J.)

4.1.3 Zukünftige Situation und potenzielle Problematik

Das Untersuchungsgebiet hat aufgrund seiner Nähe zur Stadt Braunschweig und der Verfügbarkeit von Freiflächen erhebliches Wachstumspotenzial. Laut der von dem Institut für Stadt-, Regional und Wohnforschung (2016) vorgelegten Prognoseanalyse wird die Gemeinde Vechelde mit einem Wachstum von +7,6% bis 2030 die höchste Wachstumsrate im ganzen Landkreis Peine haben. In Bezug auf das Alter der Bevölkerung wurde für das Prognosejahr 2030 ein Anstieg der Bevölkerung über 65 Jahre um 2% prognostiziert, während die Altersgruppe zwischen 45 und 65 Jahren abnimmt. Entgegen den Prognosen für die anderen Gemeinden ist ein Rückgang der Altersgruppe unter 45 Jahren nicht vorgesehen.

In allen untersuchten Orten wurden in den letzten Jahren viele neue Wohngebiete gebaut und es gibt derzeit noch eine Vielzahl von neuen Bebauungsplänen (siehe GEMEINDE VECHELDE 2019b; STADT BRAUNSCHWEIG 2019).

Hinsichtlich der Straßeninfrastruktur besteht ein Projekt zum Neubau eines Radschnellweges zwischen Vechelde und Braunschweig, der parallel zur B1 verlaufen soll (REGIONALVERBAND GROßRAUM BRAUNSCHWEIG 2017). Ein weiteres Projekt ist der Neubau eines Radweges zwischen Wedtlenstedt und Lamme entlang der Kreisstraßen K58 und K12 (REGIONALVERBAND GROßRAUM BRAUNSCHWEIG 2019).

Im Rahmen des Projektes „Stadt.Bahn.Plus“ (STADT BRAUNSCHWEIG 2017b) wurde die Erweiterung der Straßenbahnlinie 4 bis nach Lamme untersucht. Die Variante wurde aber wegen fehlender Wirtschaftlichkeit verworfen. Andere Projekte zur Verbesserung des ÖPNV-Angebots sind nach dem Kenntnisstand des Autors nicht geplant.

Das Untersuchungsgebiet hat wegen des potenziellen Wachstums und der Siedlungserweiterungen vielversprechende Zukunftsaussichten. Doch aufgrund der fehlenden ÖPNV-Verbesserungsmaßnahmen wird dieses Wachstum mit Mobilitätsproblemen verbunden sein. Der Mobilitätsbedarf der Einwohner ist aufgrund des geringen Angebots an Dienstleistungen hoch. Dies umfasst nicht nur die Arbeitsfahrten, sondern auch andere Reisezwecke wie Einkaufen, Gesundheit, Studium, Sport, etc. Hinzu kommt noch die geringe Attraktivität des ÖPNV aufgrund der langen Fahrzeiten und geringen Taktverdichtung. Im Fall von Wahle ist die Problematik wegen eines fehlenden ÖPNV-Angebots nach Braunschweig noch kritischer. Als Alternative zum ÖPNV kommen wegen der vorgesehenen neuen Radschnellwege das Fahrrad und E-Bike in Frage. Die Entfernungen betragen aber mehr als 8 km, was trotz der verbesserten Infrastruktur nicht für alle Personen sowie Reisezwecke in Frage kommen wird.

Als Alternative verbleibt dann nur das private Fahrzeug, welches in diesem Fall über eine besonders hohe Attraktivität, wegen der direkten Anbindung nach Braunschweig über die B1, verfügt. Aus diesem Grund ist mit einem Anstieg des privaten Verkehrs zu rechnen, was zu erhöhter Lärm- und Luftverschmutzung, zunehmenden Staus und steigendem Parkplatzbedarf in der Stadt führen wird.

Hinsichtlich dieser Problematik wird im Rahmen dieser Masterarbeit eine Verbesserung des ÖPNV durch ein Trunk-and-Feeder-System untersucht.

4.2 Optimierung des ÖPNV-Angebots

Wie im vorherigen Unterkapitel erwähnt, ist das ÖPNV-Angebot in dem Untersuchungsgebiet begrenzt. Die Buslinie 450 ist für die meisten Ortschaften die einzige Möglichkeit, um das städtische Gebiet mit dem ÖPNV zu erreichen. Diese Buslinie zeichnet sich aber durch lange Fahrzeiten, niedrige Taktung und Verzögerungen aus und ist damit im Vergleich zum privaten Pkw unattraktiv. Zur Optimierung des ÖPNV-Angebots wird in der vorliegenden Masterarbeit die Ersetzung der bestehenden Buslinie 450 durch ein Trunk-and-Feeder-System analysiert. Das vorgeschlagene Trunk-and-Feeder-System besteht aus einem Bus-Rapid-Transit (BRT) System für die direkte und schnelle Verbindung zwischen den Ortschaften und der Innenstadt und einem On-Demand (OD) System für die Sammel- und Zubringerfunktionen. Das Bild 4-6 stellt den Linienverlauf der BRT-Linie, das Betriebsgebiet jedes OD-Zubringersystems sowie die Mobilstationen als Mobilitätsschnittpunkte dar.

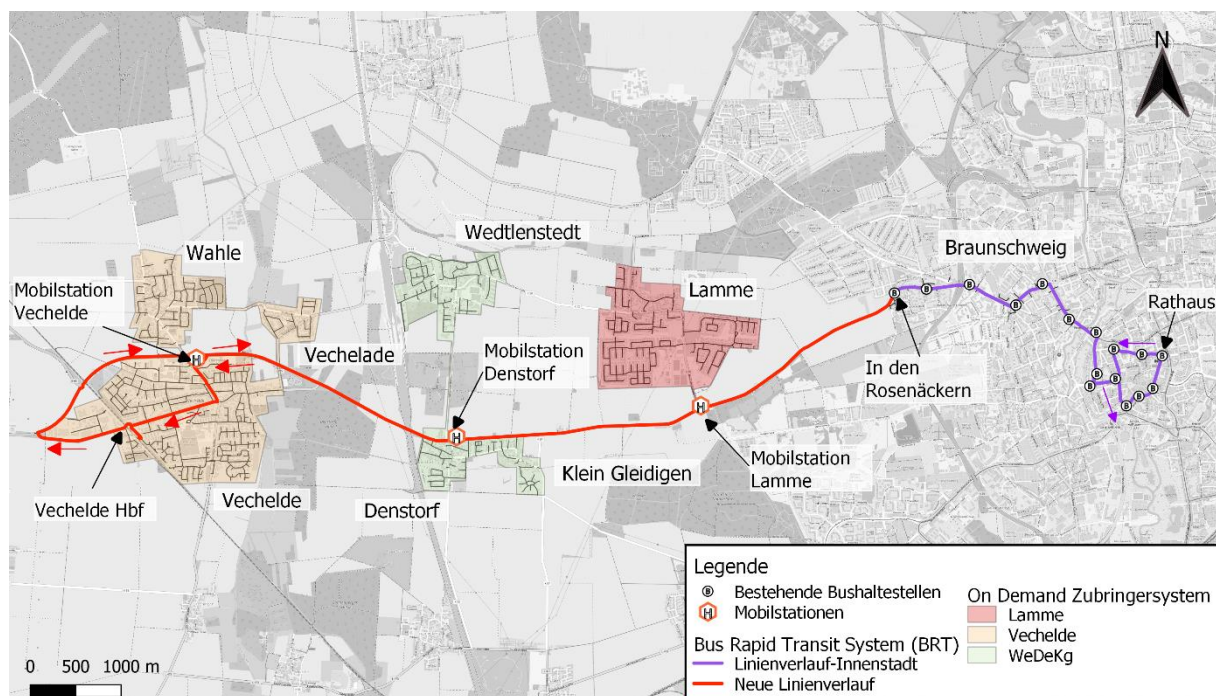


Bild 4-6 Vorgeschlagenes Trunk-and-Feeder-System (eigene Darstellung aus ©OpenStreetMap)

Die BRT-Linie verbindet den Bahnhof Vechele mit dem Rathaus Braunschweig (siehe Bild 4-6). Der Linienverlauf erfolgt über die Bundesstraße B1 (rote Linie) und geht dann in der Innenstadt ab der Haltestelle „In den Rosenäckern“ in den heutigen Verlauf der Buslinie 450 über (lila Linie). Verbesserungsmaßnahmen des BRT-Linienvverlaufs im Stadtgebiet würden eine Nachfragemodellierung und eine globale Analyse unter Berücksichtigung aller ÖPNV-Linien erfordern. Dies würde den Umfang dieser Masterarbeit überschreiten und wird daher nicht detaillierter ausgearbeitet. Nichtsdestotrotz werden im Unterkapitel 4.4 Überlegungen zur zukünftigen Optimierung vorgeschlagen.

Die Fahrt in jeder Richtung hat eine Länge von ca. 16 km und 15 Haltestellen (3 Mobilstationen und 12 bestehende Bushaltestellen im Stadtgebiet). Dies bedeutet eine Reduktion von ca. 2 km und 10 Stationen im Vergleich zur heutigen Buslinie 450.

Für den Linienverlauf von Vechelde nach Braunschweig wurde eine schnelle Zufahrt zur B1 über die Hildesheimer Straße in Richtung West gewählt, um die Zeitverluste wegen des Verkehrs auf der Hauptstraße und der zwei Lichtsignalanlagen zu reduzieren. Für den Linienverlauf von Braunschweig nach Vechelde wird die Ausfahrt von der B1 über die Sophientaler Straßen aufgrund der Lage der Mobilstation vorgeschlagen. Eine zusätzliche Haltestelle auf der Hildesheimer Straßen im Zentrum Vechelde wäre dadurch möglich. Dies könnte besonders für Schüler hilfreich sein.

Zwischen der Endhaltestelle „Vechelde Bahnhof“ und dem städtischen Gebiet hat die BRT-Linie lediglich drei Haltepunkte, die als Mobilstationen geplant werden. Diese Mobilstationen dienen als Schnittpunkte mit den Zubringersystemen, die die weitere Erschließung der Fläche abwickeln. Dieser Entwurf ermöglicht den Anschluss von Wahle und Lamme an die BRT-Linie. Die Betriebsgebiete jedes OD-Zubringersystems sind im Bild 4-6 dargestellt: Das OD-Zubringersystem Vechelde (orange) in Vechelde, Wahle und Vechelade, das OD-Zubringersystem Denstorf (grün) in Wedtlenstedt, Denstorf und Klein Gleidigen sowie das OD-Zubringersystem Lamme (rot) in Lamme. Diese Betriebsgebiete gelten auch für den nichtmotorisierten Individualverkehr. Die längsten Entfernungen zwischen dem jeweiligen Zuhause und der entsprechenden Mobilstation liegen bei rund 3 km, was für eine Radfahrt noch im Rahmen ist.

Im Folgenden werden die Mobilstationen, das BRT-System, die OD-Zubringersysteme sowie der nichtmotorisierte Individualverkehr für die Fahrt zu/von der Mobilstation beschrieben.

4.2.1 Mobilstationen

Das vorgeschlagene Trunk-and-Feeder-System erfordert Intermodalität, das heißt, dass die Passagiere zuerst mit nichtmotorisiertem Individualverkehr oder mit dem OD-Zubringersystem bis zur Mobilstation fahren und dort die BRT-Linie bis zur Innenstadt nehmen. Um diese Intermodalität attraktiver zu machen, sind einfache und nahtlose Übergänge zwischen den unterschiedlichen Mobilitätsdienstleistungen auf der Mobilstation zu gewährleisten. Die zusätzliche Nutzung der Mobilstationen als Servicepunkt für Angebote wie Einkaufen und Paketstationen spielt in diesem Fall aufgrund der unzureichenden Serviceangebote in den meisten Ortschaften eine besondere Rolle.

Aufgrund der relativ kurzen Entfernungen zur entsprechenden Mobilstation ist das Angebot von CarSharing oder Park+Ride-Anlagen nicht zu empfehlen. Für Benutzer mit

Einschränkungen oder Bevorzugung von motorisiertem Verkehr wird das On-Demand-Zubringersystem angeboten.

Die Mobilstation umfasst sechs Bereiche: BRT-Haltestellen, Haltestellen des OD-Zubringersystems, Bike+Ride-Anlage (B+R), Kiss+Ride-Anlage (K+R), Aufenthaltsraum und schließlich einen Bereich mit verschiedenen Serviceangeboten. Das Design der Mobilstation muss sich an einem reibungslosen Ablauf in der Verbindung der verschiedenen Bereiche orientieren.

Um Störungen in dem Verkehrsfluss auf der B1 sowie Zeitverluste zu vermeiden, muss die BRT-Zufahrt zur Haltestelle schnell und sicher sein. Die BRT-Haltestellen sind daher parallel zu dem Linienverlauf und mit einer eigenen Spur angeordnet. Die Haltestellen sollten über eine Buswartehalle mit Witterungsschutz und Sitzgelegenheiten sowie dynamische Fahrgastinformationen und Informationen über das ganze ÖPNV-Netz verfügen.

Jedes Fahrzeug des OD-Zubringersystems sollte über einen spezifischen und deutlich gekennzeichneten Parkplatz verfügen. Daneben ist eine dynamische Fahrgastinformation mit Informationen über die nächste Route sowie die Namen der Fahrgäste jedes Fahrzeuges einzurichten. Dies vereinfacht die Nutzung des Systems und so wird vermieden, dass Passagiere in das falsche Fahrzeug einsteigen.

Die Bike+Ride-Anlage umfasst auch andere nichtmotorisierte Verkehrsangebote wie Pedelecs, E-Bikes, Lastenräder (auch Cargobikes genannt), Scooters, etc. Die Abstellanlage sollte mit einer ausreichenden Kapazität dimensioniert werden und teilweise überdacht sein. Insbesondere für E-Bikes oder E-Scooters ist zusätzlich eine gesicherte Abstellanlage z.B. in Form von Fahrradboxen, Fahrradparkhäusern etc. in die Mobilstation zu integrieren. Der Zugang kann beispielsweise über einen Transponderschlüssel erfolgen, der dem Benutzer nach der Registrierung in das System kostenlos gewährt wird. Wegen der zunehmenden Nutzung von Scootern und E-Scootern ist die Einrichtung von adäquaten Abstellmöglichkeiten zu empfehlen (siehe Bild 4-7). Die Einrichtung einer Servicesäule mit einer Luftpumpe ist ebenfalls empfohlen.



a. Beispiel der Parksituation in Wien



b. Beispiel einer Scooter-Abstellanlage

Bild 4-7 Abstellanlagen für Scooter (a. aus DIE GRÜNEN WIEN 2019; b. aus ORION GMBH 2019)

Für die Fahrgäste, die zur Mobilstation gebracht oder von dort abgeholt werden, wird eine Kiss+Ride-Anlage eingerichtet. Diese Anlage besteht aus einer begrenzten Anzahl von Stellplätzen für eine kurze Parkdauer von maximal 10 Minuten.

Die Einrichtung eines Aufenthaltsraumes mit Witterungsschutz und Sitzplatzgelegenheiten wird die Wartezeiten angenehmer gestalten. Hier besteht die Möglichkeit energieeffiziente Heizungsanlagen zu installieren, die z.B. mit auf dem Dach installierten Solarmodulen betrieben werden könnten. Mit Blick auf die Sicherheit wird ein transparentes Design mit Glas, sowie die Installation von Kameras zur Sicherheitsüberwachung empfohlen. Für eine verstärkte Nutzung ist der Aufenthaltsraum zentral und in der Nähe aller weiteren Verkehrsangebote einzurichten.

Alle Serviceangebote sollten gut erkennbar sein und sich zusammen in einem definierten Bereich befinden. Für die vorliegenden Mobilstationen wird die Einrichtung eines Kiosks, einer Bäckerei, eines Geldautomaten sowie einer Post- und Paketstation empfohlen.

Für die Gestaltung der Mobilstationen sollte auf eine barrierefreie Infrastruktur, einen einfachen Zugang mit allen Verkehrsmitteln sowie die Vermeidung von Konfliktpunkten geachtet werden. Zur Verbesserung des Sicherheitsgefühls helfen eine helle Gestaltung, Beleuchtung, Kameraüberwachung sowie eine ausreichend breite Fußgängerzone. Besonderer Wert wird auf die Entwicklung eines einheitlichen Designs gelegt, um das Bewusstsein für die neuen Mobilitätsangebote zu erhöhen und gleichzeitig einen hohen Wiedererkennungswert für die Stationen zu schaffen. Dabei kann die Anwendung eines modularen Bausteinsystems helfen.

Die Planung der Mobilstationen erfolgte auf Basis der Empfehlungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Folgende Literatur wurde verwendet: Hinweise zu Park+Ride (P+R) und Bike+Ride (B+R), RAS 06 (Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen), ERA 10 (Empfehlungen für Radverkehrsanlagen), EAÖ 13 (Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs) sowie EAR 05 (Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs).

Auf dem Bild 4-8, Bild 4-9 und Bild 4-10 sind die Lagepläne der Mobilstation Vechelde, Denstorf bzw. Lamme dargestellt. Im Folgenden wird der vorgeschlagene Entwurf jeder Mobilstation beschrieben.

4.2.1.1 Mobilstation Vechelde

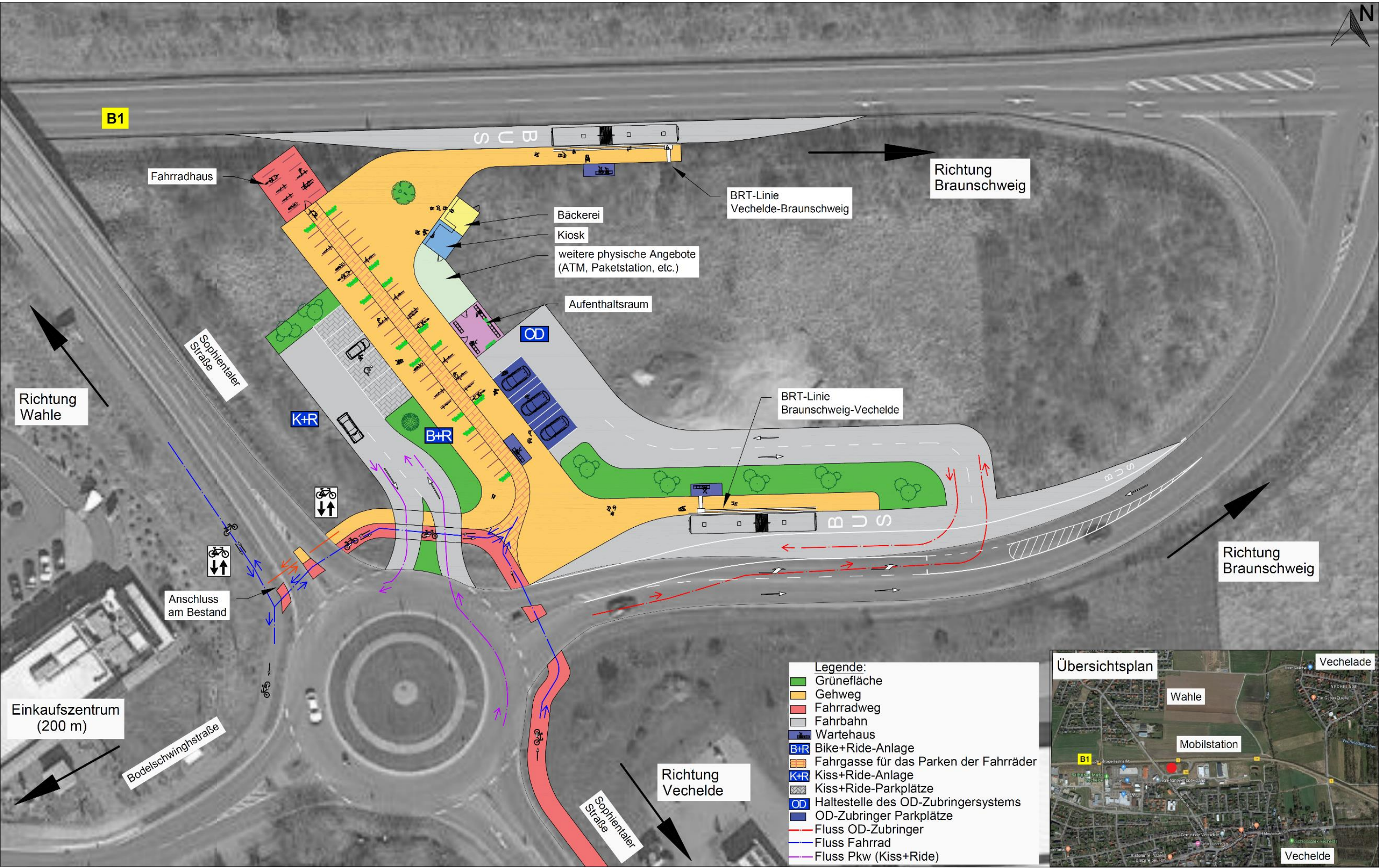


Bild 4-8 Lageplan Mobilstation Vechelde (eigene Darstellung auf Basis von ©Google Maps)

Die Mobilstation Vechelde befindet sich in einer Freifläche zwischen der B1 und der nördlichen Zugangsstraße. Diese Lage ermöglicht einen schnellen und effektiven Zugang von Vechelde, Wahle und Lamme aus, was die Fahrzeiten zwischen der Mobilstation und dem jeweiligen Zuhause optimiert. Durch die Nähe zum Einkaufszentrum wird die Mobilstation gleichzeitig attraktiver und bekannter. Die Integration der Mobilstation in dem Bahnhof wurde aufgrund der entfernten Lage, fehlender Serviceangebote und des eingeschränkten Zuganges ausgeschlossen. Das Design der Mobilstation ermöglicht eine getrennte Ein- und Ausfahrt für alle Verkehrsteilnehmer.

Die Haltestellen der BRT-Linie sind als Busbucht geplant. Dies erhöht die Sicherheit der Fahrgäste, ermöglicht eine schnellere Zufahrt und verbessert den Verkehrsfluss auf der Bundesstraße B1.

Die Ein- und Ausfahrt des OD-Zubringers (siehe rote Linie auf dem Bild 4-8) erfolgt über den westlichen Ast des Kreisverkehrs. Zur sicheren Einfahrt in die Mobilstation ist eine Linksabbiegerspur geplant. Die OD-Zubringer verkehren nicht auf der B1, sodass kein Fluss von bzw. zur B1 vorgesehen ist. Um Zeitverluste in diesem System zu vermeiden, erfolgt die Ein- und Ausfahrt der K+R-Anlage (lila Linie) getrennt. Dafür ist ein neuer Ast in dem Kreisverkehr geplant.

Die blauen Linien auf dem Bild zeigen die Radverkehrsflüsse. Für den Radverkehr aus Vechelde und Lamme ist ein neuer Radweg südwestlich des Kreisverkehrs geplant. Dies vermeidet den Radverkehr in Gegenrichtung des Kreisverkehrs, was die Verkehrssicherheit erhöht. Der Radverkehr aus bzw. nach Wahle erfolgt über den bestehenden Geh-/Radweg (Zweirichtungsradweg) nordöstlich des Kreisverkehrs. Die Überquerung am nördlichen Ast des Kreisverkehrs (Sophientaler Straße) ist mit einem Zweirichtungsradweg geplant.

Die K+R-Anlage verfügt über sechs Stellplätze, wovon einer für Menschen mit Behinderung vorgesehen ist. Die B+R-Anlage verfügt über 42 Anlehnbügel (Kapazität von 84), ein Fahrradhaus mit 10 Anlehnbügel (Kapazität 20) und einen Scooter-Parker (Kapazität von 12). Die Parkmöglichkeit für Lastenräder ist in der angegebenen Kapazität enthalten. Die Gesamtfläche der Mobilstation beträgt ca. 2.900 m².

4.2.1.2 Mobilstation Denstorf

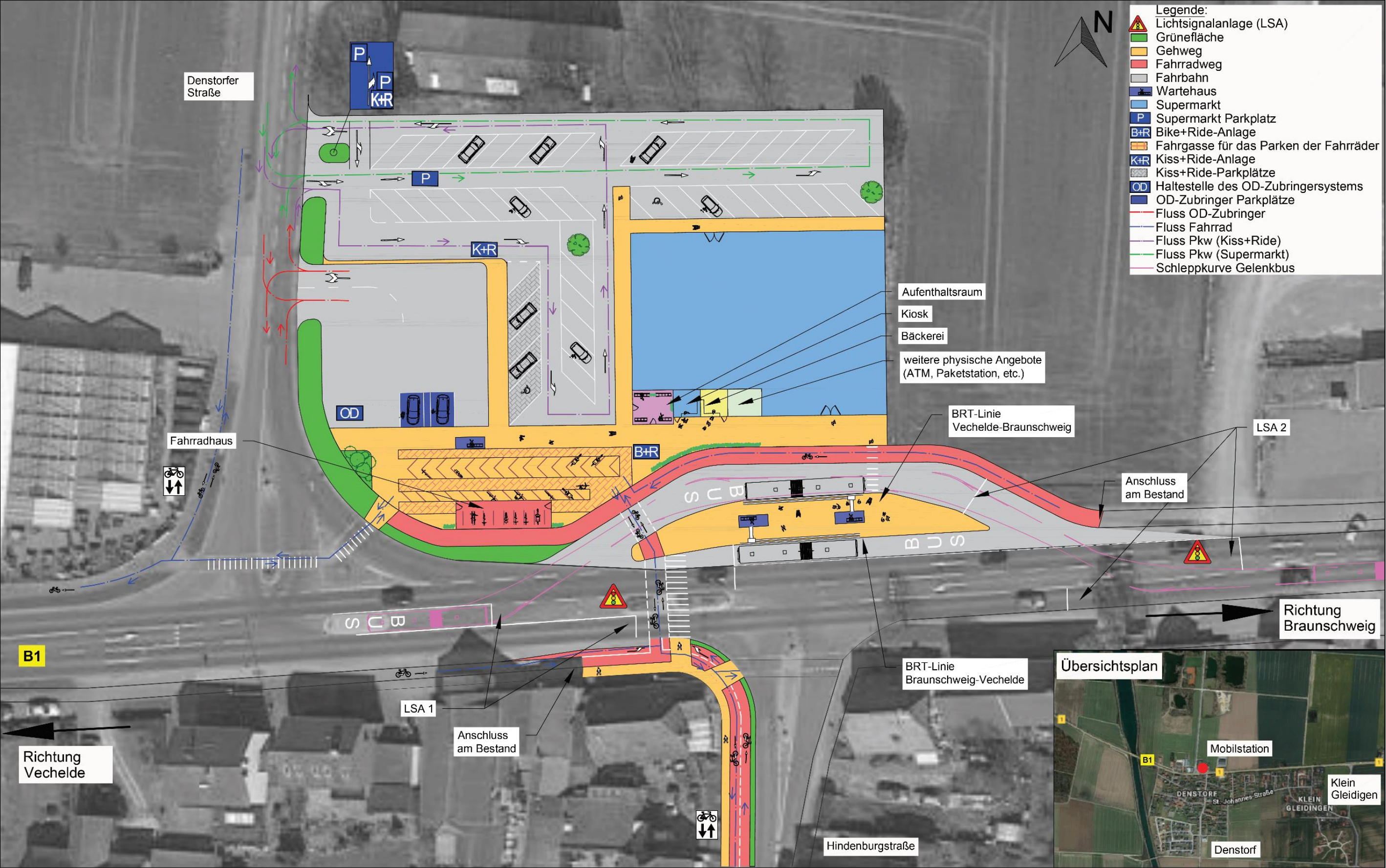


Bild 4-9 Lageplan Mobilstation Denstorf (eigene Darstellung auf Basis von ©OpenStreetMap)

Die Mobilstation Denstorf ist im Nordosten der Kreuzung der B1 mit der K52 geplant. Die betroffene Fläche wird im Rahmen des Bebauungsplans "Heerstraße" einer Wiedernutzbarmachung unterzogen (Gemeinde Vechelde 2019b). Die Einrichtung der Mobilstation nördlich der B1 ist für die BRT-Linie in Richtung Vechelde-Braunschweig nicht vorteilhaft. Eine andere Lösung ist jedoch aufgrund fehlender Flächenverfügbarkeit nicht möglich.

Die Haltestelle der BRT-Linie ist in Insellage geplant. Um ein sicheres Ein- und Ausfahren des Busses in Richtung Braunschweig zu gewährleisten, sind eine Linksabbiegerspur und zwei Lichtsignalanlage (LSA) einzurichten (siehe Bild 4-9). Die LSA 1 steuert die Einfahrt der BRT-Busse von Vechelde in die Mobilstation sowie die Überquerung von Fußgängern und Radfahrern. Infolgedessen ist an der LSA eine ÖPNV-Bevorrechtigung sowie Anforderungsanlagen mit Berührungsdetektoren für die Fußgänger und Fahrradfahrer geplant. So werden die Störungen des Verkehrsflusses auf der B1 minimiert. Die LSA 2 wird den Verkehr auf der B1 unterbrechen, wenn ein BRT-Bus die Mobilstation in Richtung Braunschweig verlässt. Dementsprechend wird an dieser LSA ebenfalls eine ÖPNV-Bevorrechtigung eingebaut.

Denstorf, Klein Gleidigen und Wedtlenstedt verfügen über keine Nahversorgungsangebote. Die Einrichtung eines Supermarkts wird daher die Attraktivität der Mobilstation für die Nutzer erheblich erhöhen. Gleichzeitig wird die Anzahl der Wege nach Vechelde für diesen Fahrtzweck deutlich reduziert. Ein Parkplatz für Kunden (max. eine Stunde) und Mitarbeiter ist bereitzustellen. Die Ein- und Ausfahrt zu diesem Parkplatz sowie zur K+R-Anlage erfolgt über die Denstorfer Straße (grüne bzw. lila Linie im Bild). Die K+R-Stellplätze müssen deutlich gekennzeichnet sein, um eine falsche Nutzung zu vermeiden.

Die Ein- und Ausfahrt der OD-Zubringer erfolgt ebenfalls über die Denstorfer Straße, jedoch getrennt. Die verfügbare Fläche für dieses System wurde unter Berücksichtigung einer möglichen zukünftigen Erweiterung der Mobilstation überdimensioniert.

Die B+R-Anlage verfügt über zwei Ein- und Ausfahrten. Die westliche Zufahrt ist für den Radverkehr von und nach Wedtlenstedt über den bestehenden Geh-/Radweg (Zweirichtungsradweg) vorgesehen. Die Radverkehrsströme sind auf dem Bild in blauen Linien dargestellt. Der Radverkehr von Denstorf und Klein Gleidigen zur Mobilstation wird am meisten über die Hindenburgstraße erfolgen. Für eine bessere Verkehrssicherheit der Radfahrer wird ein Zweirichtungsradweg auf der westlichen Seite dieser Straße vorgeschlagen. Die Ein- bzw. Ausfahrt der B+R-Anlage erfolgt über die östliche Zufahrt.

Die Fläche der Mobilstation Denstorf beträgt ca. 3.200 m². Die Fläche des Supermarktes (Gebäude + Parkplatz) entspricht ca. 2.600 m², sodass sich eine totale Fläche von ca. 5.800 m² ergibt. Der Supermarkt-Parkplatz hat eine Kapazität von 38 Stellplätzen (davon zwei für Menschen mit Behinderung). Für die K+R-Anlage wurden fünf Stellplätze geplant und eine

davon für behinderte Personen. Die B+R-Anlage verfügt über 43 Anlehnbügel mit einer Kapazität von 86 Fahrrädern und ein Fahrradhaus mit einer zusätzlichen Kapazität von 18 Fahrrädern (9 Anlehnbügel). Ein Scooter-Parker sowie Parkmöglichkeiten für Lastenräder sind in der Anlage ebenfalls enthalten.

4.2.1.3 Mobilstation Lamme

Für die Mobilstation Lamme wurde eine freie Fläche westlich der Kreuzung der B1 und L638 gewählt. Die Lage ermöglicht das schnelle Umsteigen der Fahrgäste in die BRT-Linie nach Braunschweig. Die Haltestelle in Richtung Braunschweig-Vechelde liegt wegen Raumeinschränkungen ca. 60 m auf der anderen Seite der B1. Der Fußgängerfluss ist auf dem Bild 4-10 in oranger Linie dargestellt. Eine Anpassung der bestehenden Busbuchten ist auf Grund der Verkehrssicherheit sowie zur Verringerung der Haltestellenaufenthaltszeit erforderlich. An beiden Wartebereichen ist die Einrichtung eines Buswartehauses vorgesehen. Die Ein- und Ausfahrt der OD-Zubringer sowie des privaten Verkehrs zur K+R-Anlage ist wegen Raumeinschränkungen zusammengeführt. Um Zeitverluste zu minimieren, verfügen die OD-Zubringer über eigene Spuren. Der Verkehrsfluss von diesem System ist auf dem Bild 4-10 in roten Linien dargestellt. Die lila Linien stellen den Verkehrsfluss zur K+R-Anlage dar. Für einen effizienteren ÖPNV-Service ist an der Lichtsignalanlage eine Bevorrechtigung für die BRT-Linie sowie für die OD-Zubringer zu empfehlen.

Die Zufahrt zur Bike+Ride-Anlage erfolgt über den bestehenden Geh-/Radweg (Zweirichtungsradweg). Der Radverkehrsfluss ist auf dem Bild in blauen Linien dargestellt. Diese Anlage hat eine Kapazität für 100 Fahrräder (50 Anlehnbügel) mit einer zusätzlichen Kapazität von 28 Fahrrädern im Fahrradhaus. Parkmöglichkeiten für Lastenräder und Scooter sind in der Anlage ebenfalls erhalten. Die Kiss+Ride-Anlage ist mit sechs Stellplätzen (eine für Menschen mit Behinderung) geplant. Die gesamte Fläche der Mobilstation beträgt ca. 2.700 m².

Das Freibad Raffteich liegt ca. 300 m von der Mobilstation entfernt. Dies könnte in den sommerlichen Monaten zu einer potenziellen Erhöhung der Nachfrage der BRT-Linie führen.

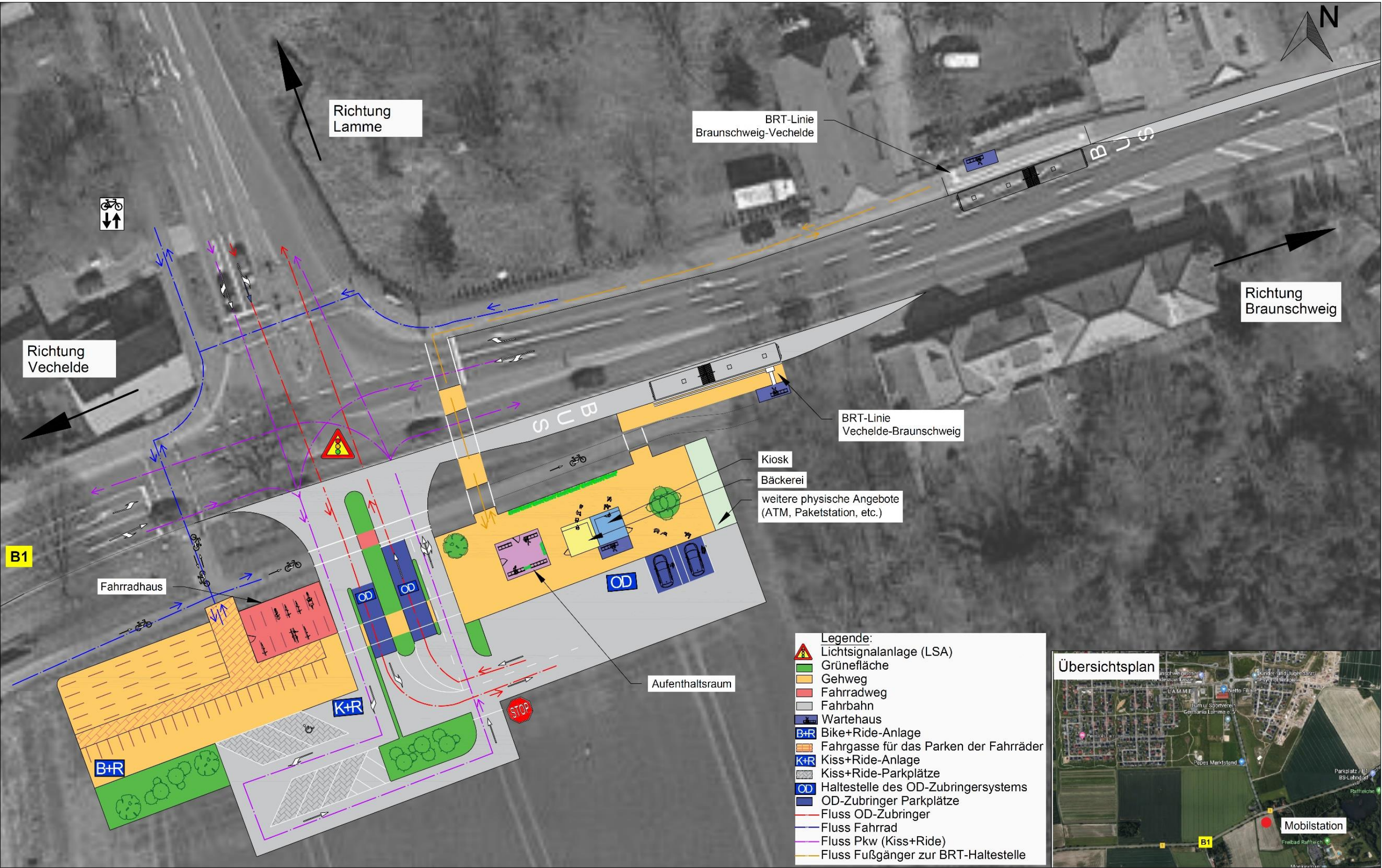


Bild 4-10 Lageplan Mobilstation Lamme (eigene Darstellung auf Basis von ©OpenStreetMap)

4.2.2 Bus-Rapid-Transit-System

Das BRT-System dient der stark nachgefragten Verbindung zwischen den Ortschaften und der Innenstadt Braunschweig. Im Folgenden wird der Fahrplan des BRT-Systems erstellt und die zu empfehlenden Eigenschaften der Busse beschrieben.

4.2.2.1 Fahrplan

Um das ÖPNV-Angebot attraktiver zu machen, ist die Erhöhung der Taktverdichtung unerlässlich. An Werktagen wird die BRT-Linie zwischen 06:00 und 21:00 Uhr mit einem konstanten Takt von 15 Minuten betrieben. Für den Nachtverkehr zwischen 21:00 und 01:00 Uhr ist eine Taktfrequenz von 30 Minuten geplant. Zwischen 01:00 und 6:00 Uhr werden die Busse in Stundentakt verkehren.

Samstags wird zwischen 06:00 Uhr und 10:00 Uhr ein 30-Minuten Takt angeboten. Für den Rest des Tages ist der gleiche Fahrplan wie an den Werktagen geplant. Sonntags sowie an Feiertagen ist die Nachfrage von Fahrten in die Stadt sehr gering, deswegen werden Fahrten am ganzen Tag im Stundentakt angeboten.

4.2.2.2 Fahrzeuge

Die Busse sind ein wesentliches Marketingelement des BRT-Systems. Sie müssen komfortabel, barrierefrei zugänglich, umweltfreundlich und wiedererkennbar sein. Infolgedessen werden Elektro-Gelenkbusse mit einer aerodynamischen und modernen Gestaltung empfohlen. Das Bild 4-11 zeigt zwei Beispielmmodelle der Firmen Irizar und Van Hool.

Die Kapazität der Busse variiert je nach Unternehmen. Das Beispielmmodell der Firma Irizar (Bilder b und c) hat eine Länge von 18m, vier Türen und eine Kapazität von 155 Passagieren (ca. 39 Sitzplätze und 116 Stehplätze je nach gewählter Konfiguration). Das Fahrzeug verfügt über Lithium-Batterien mit einer Kapazität von 90-150 kWh und einer Ladezeit von ca. drei Stunden (IRIZAR 2019). Die Braunschweiger Verkehrs-GmbH, die derzeit die Buslinie 450 betreibt, verfügt bereits über eine Flotte von Elektrofahrzeugen und die notwendige Infrastruktur für deren Aufladung und Wartung, sodass die Einführung neuer Elektrofahrzeuge keine größeren Hindernisse mit sich bringen sollte.

Die Busse sollten auch über dynamische Fahrgastinformationen verfügen. Der WLAN-Service sollte ebenfalls integriert werden, denn dies erleichtert die Buchung des OD-Systems.

Die Anzahl der Fahrzeuge sowie das erforderliche Personal werden in Abschnitt 4.3.4.1 aus den Ergebnissen der Verkehrssimulationen ermittelt.



a. Bus Van Hool ExquiCity 18 Electric



b. Bus irizar ie bus 18m



c. Innenansicht des Busses irizar ie bus 18m

Bild 4-11 Beispiele für BRT-Fahrzeuge (a. aus VAN HOOL 2019; b. und c. aus IRIZAR 2019)

4.2.3 On-Demand-Zubringersysteme

Die OD-Zubringersysteme dienen als ÖPNV-Angebot für die letzte Meile zwischen dem jeweiligen Zuhause und der entsprechenden Mobilstation (sowie in die Gegenrichtung). Die Hauptmerkmale des Systems werden im Folgenden geplant.

4.2.3.1 Servicebereich und Haltestellen

Das Betriebsgebiet der OD-Zubringersysteme wurde bereits in Bild 4-6 gezeigt. Die Fahrzeuge dürfen auf allen Straßen des Betriebsgebiets mit Ausnahme von Sackgassen fahren, da dies zu erheblichen Verzögerungen führen würde. Die maximale Gehstrecke bis zur Haltestelle beträgt dann in diesen Fällen ca. 200 bis 300 m.

Es wird eine Tür-zu-Tür-Bedienung mit virtuellen Haltestellen vorgeschlagen. Die virtuellen Haltestellen erfordern keine Beschilderung oder spezielle Infrastruktur, aber sie müssen die Sicherheit der Fahrgäste beim Ein- und Aussteigen gewährleisten. Dafür sind Haltestellen an Straßenecken, Garagen, Bäumen oder an anderen Hindernissen zu vermeiden.

4.2.3.2 Fahrplan

Die OD-Zubringersysteme werden montags bis samstags zwischen 5:45 und 21:00 Uhr angeboten, wobei die Fahrzeuge nach Bedarf fahren. In der Nacht und an Sonn- und Feiertagen steigen die Personalkosten erheblich an. Parallel dazu nimmt die Nachfrage an Mobilität ab und die Nutzung von nichtmotorisierten Verkehrsmitteln nimmt dagegen zu (BMVI 2017), sodass das System zu diesen Zeiträumen eher wie ein Taxi funktionieren würde. Wenn das OD-System außer Betrieb ist, wird ein Taxi-Service zur Verfügung stehen.

Die Nutzung von autonomen Fahrzeugen in naher Zukunft würde einen 24/7 Betrieb ermöglichen, da die Personalkosten von den Fahrern wegfallen.

Die Systeme sind in erster Linie als Zubringer zum BRT-System gedacht, daher ist eine nahtlose Verbindung zu gewährleisten. Jede OD-Fahrt beginnt nach der Ankunft eines BRT-Busses an der Mobilstation und endet vor der Ankunft des nächsten BRT-Busses an der Mobilstation. Da die BRT-Linie im 15-Minuten-Takt geplant wurde, liegt das Serviceintervall des OD-Zubringersysteme ebenfalls bei 15 Minuten. Die maximale Fahrzeit für jedes Fahrzeug wurde mit Berücksichtigung der Gehzeit von dem OD-Zubringersystem über die Mobilstation zur BRT-Haltestelle auf 13 Minuten festgelegt. Fahrten innerhalb des Betriebsgebiets können auch bedient werden, allerdings mit geringerer Priorität.

4.2.3.3 Fahrzeuge

Die OD-Fahrzeuge sollten emissions- und barrierefrei und für jeden leicht zugänglich sein. Sie sollten zudem gleichzeitig schnell und leicht auf Wohnstraßen fahren und parken können, deshalb sind Modelle größer als Kleinbusse nicht zu empfehlen. Ein attraktives und modernes Design mit einem komfortablen Innenbereich ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Installation eines Displays mit Informationen über die Route und die nächsten Haltestellen trägt zu einem schnelleren Aussteigen der Fahrgäste bei und macht die Fahrt für sie entspannter.

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden drei Fuhrparkvarianten mit zwei verschiedenen Fahrzeuggrößen analysiert:

- Variante 1: Ein E-Kleinbus mit einer Kapazität von 12 Passagieren
- Variante 2: Zwei Elektroautos mit einer Kapazität von je sechs Passagieren
- Variante 3: Ein E-Kleinbus und ein Elektroauto

Auf dem Bild 4-12 sind Beispiele von beiden Fahrzeugen zu sehen.



a. CarLE Fahrzeug mit einer Kapazität von sechs Sitzplätze



b. Reallabor Schrondorf Minibus mit einer Kapazität von 12 Sitzplätze

Bild 4-12 Beispiele für OD-Fahrzeuge (a. aus METROPOLIS-SERVICE GMBH 2019; b. aus STADT SCHORNDORF 2019)

Im Abschnitt 4.3.3.2 wird die Analyse und der Vergleich der drei vorgestellten Varianten durchgeführt.

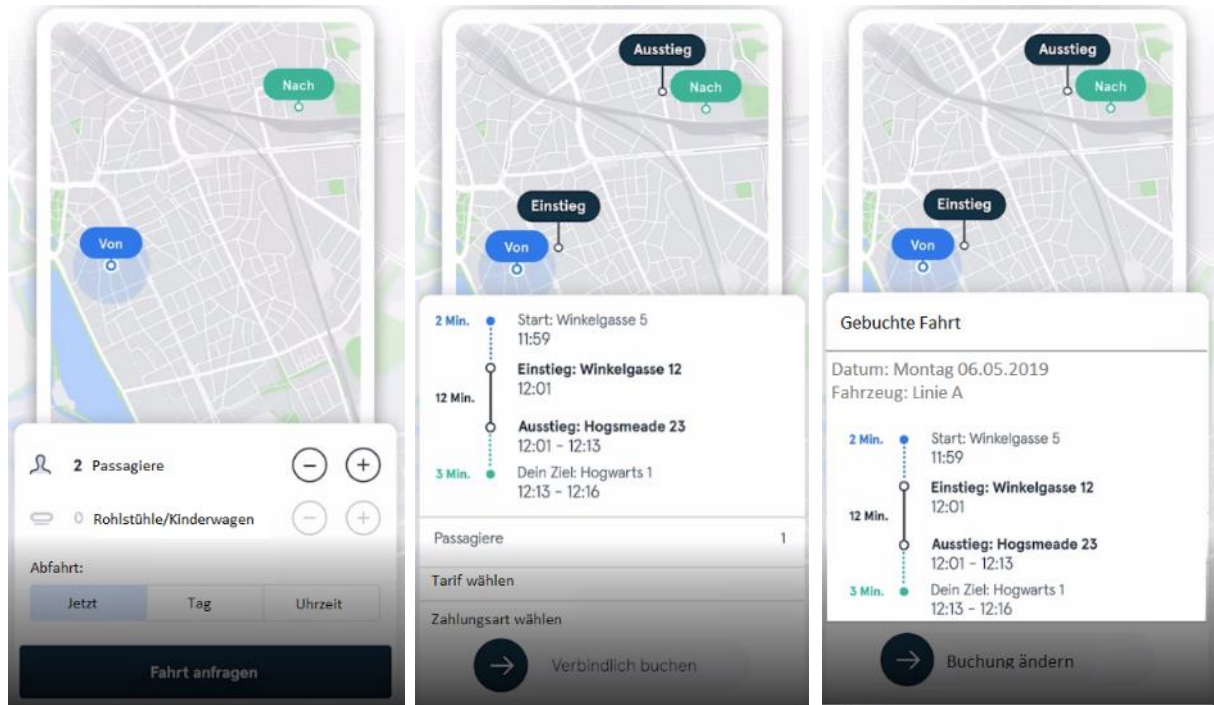
4.2.3.4 Buchung und Routing

Für die Nutzung des OD-Zubringersystems ist die vorherige Buchung über eine Smartphone-App erforderlich. Für Nutzer ohne Zugang zur App kann die Buchung über die Webseite oder telefonisch erfolgen. Der Vorteil einer App ist die Flexibilität und Echtzeitinformation für den Benutzer und für das System.

Der Buchungsprozess über eine Smartphone-App ist auf dem Bild 4-13 dargestellt. Der erste Schritt besteht aus der Fahrthanfrage (a). Der Benutzer trägt den gewünschten Start- und Zielpunkt, die gewünschte Abholzeit und die Anzahl der Passagiere ein. Ein Algorithmus analysiert die Bestellung und erstellt ein Fahrangebot. Im letzten Schritt muss der Benutzer das Angebot ablehnen oder annehmen, indem er den Tarif und das Zahlungsmittel wählt (b). Die reservierten Fahrten können vom Nutzer bis zu einer bestimmten Zeit vor der Abfahrt geändert werden (c).

Der Buchungsprozess über die Website erfolgt in ähnlicher Weise wie der über die Smartphone-App. Der Benutzer hat auch in diesem Fall die Möglichkeit, seine Buchungen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt vor der Reise zu bearbeiten. Die telefonisch gebuchten Fahrten hingegen erlauben keine Bearbeitung und ihre Zahlung erfolgt in bar beim Fahrer.

Falls autonome Fahrzeuge für das System verwendet werden, ist die Buchung des Systems nur durch die Smartphone-App oder Website möglich. Eine telefonische Buchung ist dann wegen der fehlenden Bezahlungsmöglichkeit ausgeschlossen.



a. Fahrt anfragen

b. Angebot prüfen und buchen

c. Gebuchte Fahrten bearbeiten

Bild 4-13 Buchungsschritte des OD-Zubringersystems (eigene Bearbeitung auf Grundlagen von MOIA GMBH 2019)

Alle gebuchten Fahrten werden automatisch in der App des Fahrers eingetragen. In die App ist ein Navigationssystem integriert und dieses zeigt die geplanten Fahrten mit den entsprechenden Routen, Fahrplänen und Ein- und Ausstiegspunkten der Fahrgäste. Ändert sich die Route nach Fahrtbeginn, wird der Fahrer durch ein akustisches Signal informiert.

4.2.4 Nichtmotorisierter Individualverkehr

Die Nutzung des nichtmotorisierten Individualverkehrs trägt nicht nur dazu bei, die Umwelt zu schützen, sondern führt auch zu einer Steigerung der individuellen physischen und psychischen Gesundheit und Fitness (BLONDIAU, VAN ZEEBROECK, und HAUBOLD 2016; BLUE 2014; KÜSTER und BLONDEL 2013). In diese Gruppe fallen nicht nur Fußgänger und Fahrradfahrer, sondern auch andere alternative Verkehrsmittel wie Scooters, Skateboards, Lastenräder, etc.

Bei der Gestaltung der Mobilstationen im Abschnitt 4.2.1 wurden bereits sichere und überdachte Parkmöglichkeiten für diese Verkehrsmittel berücksichtigt. Eine sichere und attraktive Infrastruktur bis zur Mobilstation ist auch zu gewährleisten. In allen Orten sind Geh-

/Radwege bis zur Mobilstation bereits vorhanden. Es ist aber nötig den Ist-Zustand zu überprüfen und den Verbesserungsbedarf zu ermitteln.

4.2.5 Tarifsysteem, Smartphone-App und Kommunikation

Zur Gewinnung von Fahrgästen, insbesondere in dem Fall von intermodalen Fahrten, ist eine transparente und nachvollziehbare Gestaltung des Tarifsystems von großer Bedeutung (ENOCH U. A. 2006).

Für das BRT-System wird empfohlen, den gleichen Tarif wie für den konventionellen Busverkehr zu nehmen. Der Tarif des OD-Zubringersystems ist ein wichtiger und kritischer Punkt. Er sollte hinreichend attraktiv und wirtschaftlich sein, um Nutzer aus dem Bereich des motorisierten Individualverkehrs zu gewinnen, jedoch nicht so günstig, um Nutzer von nichtmotorisierten Verkehrsmitteln zu gewinnen. In mehreren Praxisbeispielen von Anrufbussen wurde eine zusätzliche Zahlung von einem Euro als Komfortzuschlag angenommen (KOENIG und VIERGUTZ 2017; VETTER und HAASE 2008). Diese Variante ist auch für das hier betrachtete OD-Zubringersystem empfehlenswert. Um das ÖPNV-Angebot auch für Vielfahrer und Pendler attraktiver zu machen, sollte das OD-Zubringersystem auch in die Abo-Angebote integriert werden. Im Fall der Anwendung von autonomen Fahrzeugen ist ein differenzierter Tarif für Fahrten in den Nachtstunden zu empfehlen, denn das System dient in diesen Zeiten oft nur einem Fahrgast. Dieser Tarif könnte gleichzeitig reduziert werden, je mehr Fahrgäste sich eine Fahrt teilen.

Die Zahlung der Tickets erfolgt über die Smartphone-App bargeldlos per SEPA-Lastschrift, Kreditkarte oder PayPal. Nutzer ohne Zugang zur App können die Fahrscheine in bar beim Fahrer kaufen. Eine weitere mögliche Alternative wäre die Einrichtung von Verkaufsautomaten in den Mobilstationen. Dies wird jedoch nicht als notwendig erachtet, da die Nachfrage meistens lokal ist und sich nur eine BRT-Linie an die Mobilstationen anschließt. Die Fahrscheinkontrolle wird weiterhin von den vorhandenen Kontrolleuren übernommen.

Alle erläuterten Verkehrsangebote erfordern die Nutzung einer Smartphone-App. Infolgedessen ist es besonders wichtig alle Angebote in einer einzigen App zu integrieren. Über diese App wird ein Nutzer seine OD-Fahrt buchen und bezahlen, alle Angebote an den Mobilstationen und ihre Öffnungszeiten anfragen können, Fahrscheine für die BRT-, Bus- und/oder Tramlinien kaufen und sich für die Bike+Ride-Anlage anmelden können. Die App sollte auch die Fahrpläne aller Verkehrsangebote der Region beinhalten und aktuelle Verspätungen in Echtzeit anzeigen.

Schließlich ist die Kommunikation der neuen Verkehrsangebote besonders wichtig. Durch zielführende Kommunikationskonzepte können zusätzliche Impulse zur Ausschöpfung des Potenzials der neuen Verkehrsangebote gesetzt werden.

4.3 Verkehrssimulationsszenarien

Das vorgeschlagene Trunk-and-Feeder-System zur Optimierung des ÖPNV wurde mithilfe von mikroskopischen Verkehrssimulationen mit dem Programm SUMO analysiert. Das Ziel der Simulation ist es, das BRT-System, die OD-Zubringersysteme sowie deren Verbindung zu analysieren und das Verbesserungspotenzial im Vergleich zur derzeitigen Situation einzuschätzen. Infolgedessen werden zwei verschiedene Szenarien erstellt: Das erste Szenario (Szenario 0) simuliert das aktuelle ÖPNV-Angebot (Buslinie 450), während das zweite Szenario (Szenario 1) das vorgeschlagene BRT-System und die gewählte Variante jedes OD-Zubringersystems betrachtet. Die Datengrundlage beider Szenarien stammt aus dem Projekt „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM)“ (SCHNIEDER und LEMMER 2012). In Rahmen dieses Projektes wurde der Verkehr für 24 Stunden eines Wochentagetypes Dienstag/Donnerstag in der Stadt Braunschweig simuliert.

Die drei Varianten des Fuhrparks für jedes OD-Zubringersystem wurden in einer zusätzlichen Simulation mithilfe des im Abschnitt 3.2 bereits erklärten DARP-Algorithmus analysiert. Die bestgeeignete Variante für jedes System wurde ausgewählt und dann in das Szenario 1 integriert.

Im Folgenden wird zunächst die Datengrundlage der Simulationsszenarien beschrieben. Danach wird das Szenario 0 näher erläutert und die Ergebnisse ausgewertet. Als nächstes wird die Analyse der Fuhrparkvarianten des OD-Zubringersystems durchgeführt und schließlich wird das Szenario 1 präsentiert und seine Ergebnisse erläutert.

4.3.1 Datengrundlage der Simulationsszenarien

Die Erstellung von Szenarien für mikroskopische Simulationen in großem Maßstab, wie z.B. für Städte, ist wegen der erforderlichen detailreichen Straßennetze sowie Verkehrsnachfrage ein großer Aufwand. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde daher ein bestehendes Simulationsszenario der Stadt Braunschweig verwendet, welches dann an die Bedürfnisse der vorliegenden Arbeit angepasst wurde.

Das Szenario wurde im Rahmen des Projekts „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM)“ von dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) erstellt (SCHNIEDER und LEMMER 2012). Nach Krajewicz, Furian, und Vergés (2014) wurde das Straßennetz aus einer digitalen Straßenkarte der Firma Navteq importiert und die Positionen der Lichtsignalanlagen wurden von der Bellis AG bereitgestellt. Aufgrund fehlender Informationen über die realen LSA-Schaltpläne wurden diese manuell angepasst. Das Netz umfasst die gesamte Stadt Braunschweig und besteht aus 14.016 Knotenpunkten (in etwa Kreuzungen) und 31.316 Kanten (in etwa Straßen) auf einer Fläche von ca. 62.500 ha (25 km x 25 km).

Die Nachfrage wurde auf der Grundlage des Verkehrsnachfragemodells "VALIDATE" der Firma PTV Group definiert, welches Daten über die Quelle-Ziel-Matrizen für die fünf typischen Wochentagsklassen getrennt in Leicht- und Schwerverkehr hat (VORTISH und WABMUTH 2007). Für das Szenario wurden die Daten von der Wochentagsklasse Dienstag/Donnerstag verwendet. In den Spitzenstunden simuliert das Szenario ca. 10.000 Fahrzeuge in der ganzen Stadt Braunschweig.

Da das AIM-Projekt nur die Stadt Braunschweig umfasst, d.h. nur bis zum Ort Lamme, war es daher notwendig die fehlenden Ortschaften sowie die Strecke der Bundesstraße B1 bis Vechelde hinzuzufügen. Dies erfolgte mithilfe der Daten von ©OpenStreetMap und ©Google Maps. Auf dem Bild 4-14 ist eine Aufnahme der Simulation dargestellt.

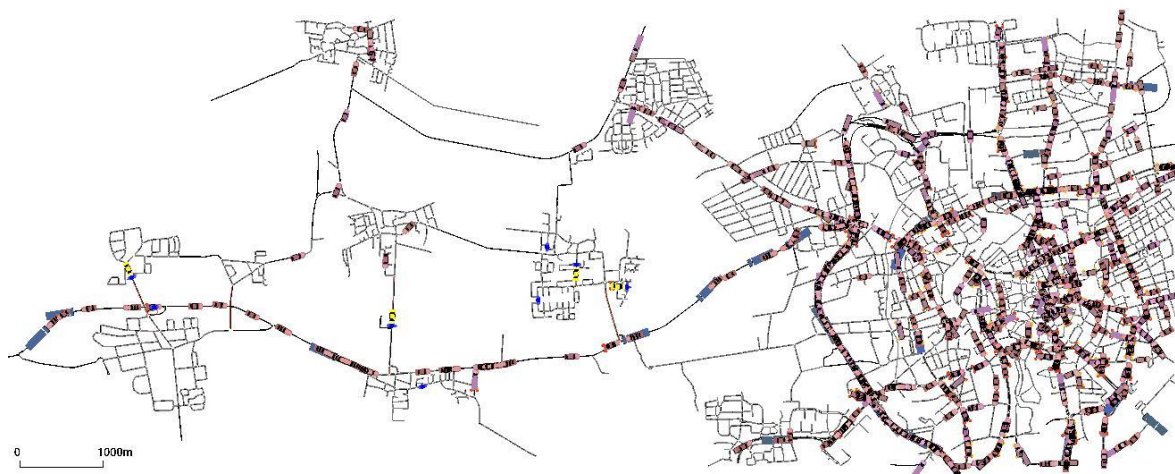


Bild 4-14 Verkehrsnetz und Umgebungsverkehr (eigene Darstellung)

Der Verkehr auf der hinzugefügten Strecke der B1 wurde auf der Grundlage des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) aus der Straßeninformationsbank Niedersachsen (NWSIB-NI) erzeugt. Der DTV wurde räumlich nach der Einwohnerzahl der Orte und zeitlich auf Basis der Daten von der Dauerzählstelle „Groß Lafferde“ von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aufgeteilt. Die genannte Dauerzählstelle liegt 9 km östlich von Vechelde.

4.3.1.1 Validierung

Die Verkehrsnachfrage in dem ganzen Straßennetz wurde mithilfe der täglichen Verkehrsbelastungen der Stadt Braunschweig validiert (siehe Anhang 3). Das Bild 4-15 zeigt die täglichen Verkehrsstärken in der Simulation.

Die Verkehrsmengen stimmen nicht vollständig mit den Werten der Stadt Braunschweig überein, sind aber vergleichbar und entsprechen einem gültigen Szenario des Verkehrs in dem Gebiet.

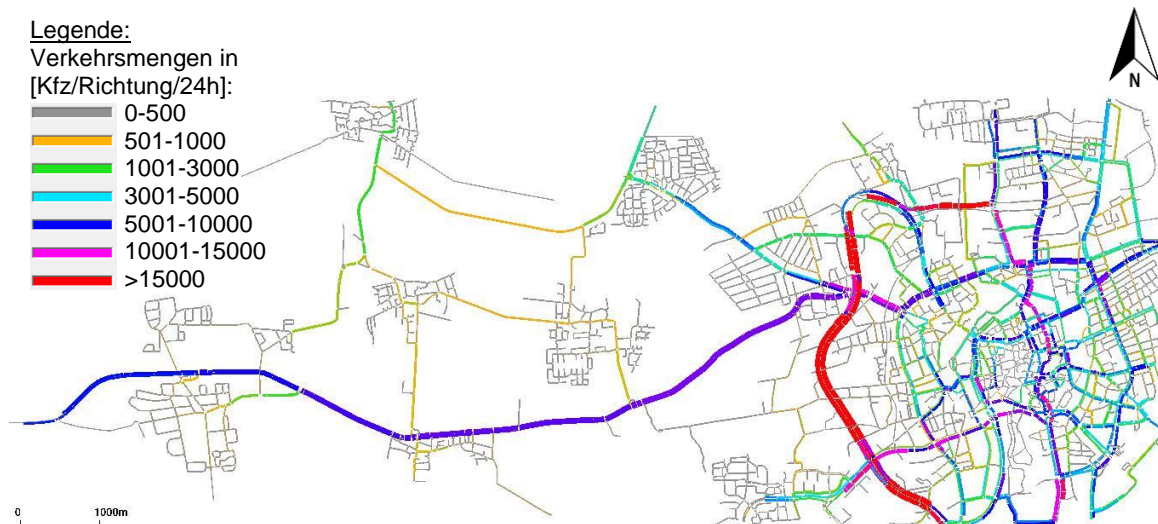


Bild 4-15 Simulierte tägliche Verkehrsmenge je Richtung (eigene Darstellung)

Auf dem Bild 4-16 ist die Fahrzeuganzahl über die Zeit in dem ganzen Verkehrsnetz dargestellt. Es zeigt sich eine typische Tagesganglinie mit morgendlichen und abendlichen Spitzenstunden zwischen 7:00 und 8:00 Uhr bzw. 16:00 und 17:00 Uhr. Die maximale Fahrzeuganzahl liegt bei ca. 2.200 Fahrzeugen.

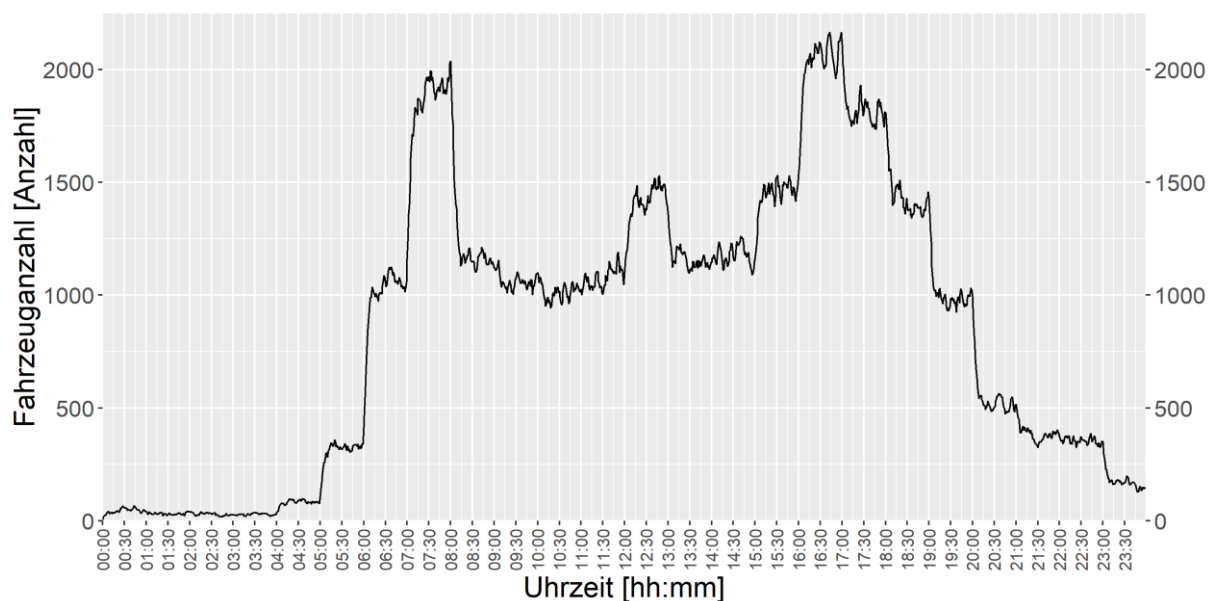


Bild 4-16 Verläufe der Fahrzeuganzahl über die Zeit in der Simulation (eigene Darstellung)

4.3.2 Aktuelle Buslinie 450 (Szenario 0)

Die Buslinie 450 wurde auf der Grundlage des offiziellen Fahrplans in die Simulation einbezogen. Laut verschiedener Studien liegt die Haltestellenaufenthaltszeit für konventionelle Busse mit zwei Türen zwischen 20 und 40 Sekunden (HOOK und WRIGHT 2007; LEHNHOFFA und JANSSENA 2003; STADTRAUM GMBH 2017). Für die Simulationen wurde der Mittelwert von

30 Sekunden angenommen. Die Bushaltestellen wurden mithilfe der Daten von ©OpenStreetMap und ©Google Maps hinzugefügt.

Um die gesamte Fahrzeit zur Innenstadt mit der Buslinie 450 zu analysieren, ist es auch notwendig die Gehzeiten zur Bushaltestelle zu betrachten. Dafür wurde eine Vielzahl von Fahrgästen simuliert, die von ihrem Zuhause bis zu der nächst liegenden Bushaltestelle zu Fuß gehen. Der Anfangspunkt (Zuhause) wurde zufällig auf dem Verkehrsnetz ausgewählt.

Gleichzeitig ist es sinnvoll den ÖPNV-Service mit dem motorisierten Individualverkehr zu vergleichen. Dafür wurde eine Vielzahl von Pkw-Fahrten zwischen den Orten und der letzten Bushaltestelle (Rathaus) simuliert. Für die Parkplatzsuchzeit wurde ein konstanter Wert von sechs Minuten angenommen. Dieser Wert ergibt sich aus der Studie von Cookson und Pishue (2017), in der die Zeitverluste durch die Parkplatzsuche in 10 deutschen Städten analysiert wurden.

Die in der Simulation verwendeten Fahrzeugparameter für die Busse der Linie 450 und die privaten Pkws sowie die Parameter der Fußgänger sind im Anhang 2 angegeben.

Um repräsentative Werte zu erhalten, wurden 10 Simulationen durchgeführt. Die Input- und Output-Dateien der Simulationen befinden sich im digitalen Anhang 4. In dem genannten Anhang ist ein 2D-Video von einem Teil der Simulation für ein besseres Verständnis zu sehen.

4.3.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen unterscheiden sich von den Fahrzeiten im offiziellen Fahrplan der Buslinie 450. Die Fahrzeiten in der Simulation sind insgesamt ca. sechs Minuten länger für jede Strecke (Vechelde-Braunschweig und die Gegenrichtung). Diese Unterschiede ergeben sie sich aus kleinen Verzögerungen entlang des ganzen Linienvverlaufs, sodass punktuelle Fehler in dem Netz (z.B. in einer Signalanlage) ausgeschlossen werden. Um die offizielle Fahrzeit zu erreichen, müssen die Haltestellenaufenthaltszeiten unter 15 Sekunden liegen, was für eine konventionelle Buslinie sehr unwahrscheinlich ist, oder es müssen mehrere Haltestellen aufgrund des fehlenden Ein- oder Ausstiegs von Fahrgästen ausgelassen werden. Da vom Betreiber der Buslinie keine Informationen zur Verfügung gestellt wurden, werden die Simulationsergebnisse im Folgenden als gültig betrachtet.

Die Umlaufzeit (ohne Wendezeit) variiert zwischen 78 und 84 Minuten mit einem Mittelwert von knapp 81 Minuten (siehe Bild 4-17). Nur in 44% der gesamten Umlaufzeit befindet sich der Bus ohne Störungen in Bewegung (netto Fahrzeit).

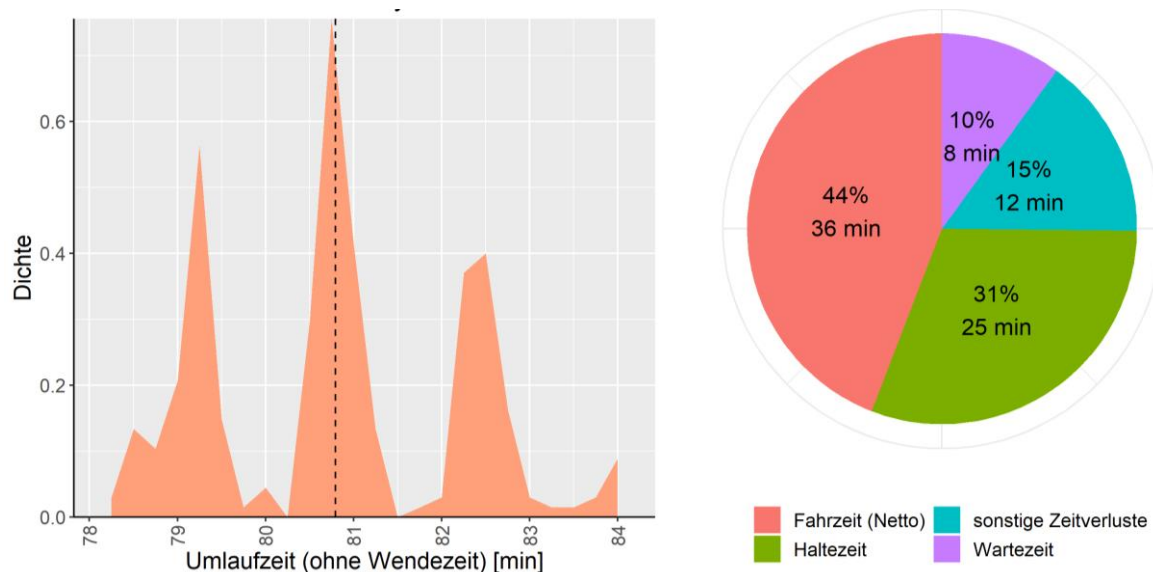


Bild 4-17 Buslinie 450: Umlaufzeit und ihre Zeit-Komponenten (eigene Darstellung)

Die größten Zeitverluste ergeben sich aufgrund der hohen Haltezeiten von 25 Minuten (31% der Umlaufzeit). Die Wartezeiten und sonstigen Zeitverluste liegen bei acht bzw. 12 Minuten. Bei Wartezeiten steht das Fahrzeug still (Geschwindigkeit Null), z.B. an einer Ampel. Die sonstigen Zeitverluste beinhalten alle Situationen, in denen das Fahrzeug die maximal mögliche Geschwindigkeit nicht erreichen konnte (z.B. durch Verkehrsstaus).

Auf dem Bild 4-18 ist die Fahrzeit für jeden simulierten Bus als Kastenplot (Boxplot) dargestellt. Jeder Kasten stellt die 10 Simulationsfälle für jede Abfahrtszeit und Richtung dar.

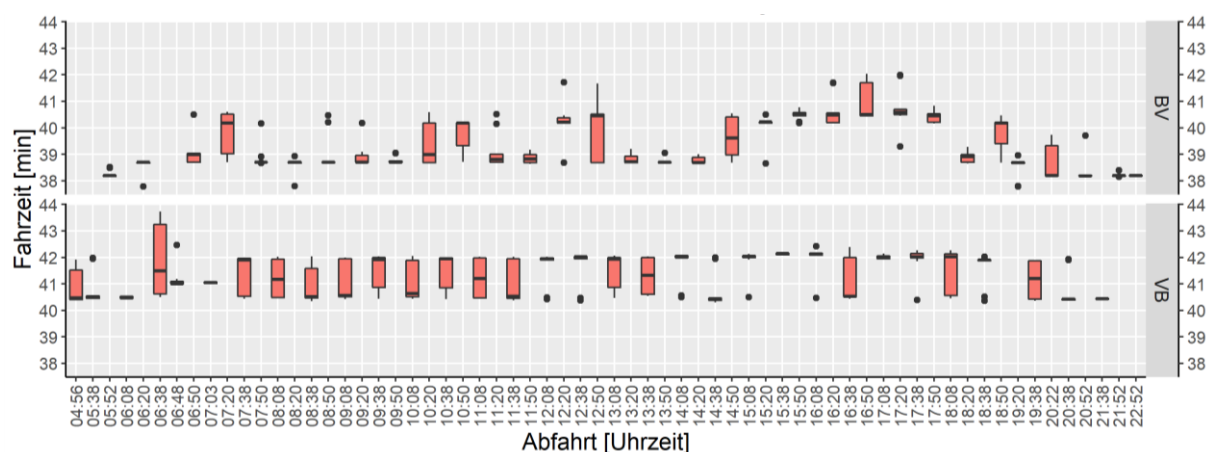


Bild 4-18 Buslinie 450: Fahrzeiten nach Abfahrtszeit und Fahrtrichtung (eigene Darstellung)

Wie zu erkennen ist, gibt es kaum einen Einfluss auf die Fahrzeiten durch den Verkehr in den Spitzenstunden. Die Fahrzeit für die Strecke Vechelde-Braunschweig (VB) liegt im Durchschnitt bei 41 Minuten, wobei die Gegenrichtung (BV) eine Fahrzeit von 39 Minuten zeigt.

Die maximale Fahrzeit zwischen den Haltestellen beträgt 2,3 Minuten, während die durchschnittliche Fahrzeit bei 1,2 Minuten liegt (siehe Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2 Buslinie 450: Fahrzeiten und Entfernungen zwischen Haltestellen

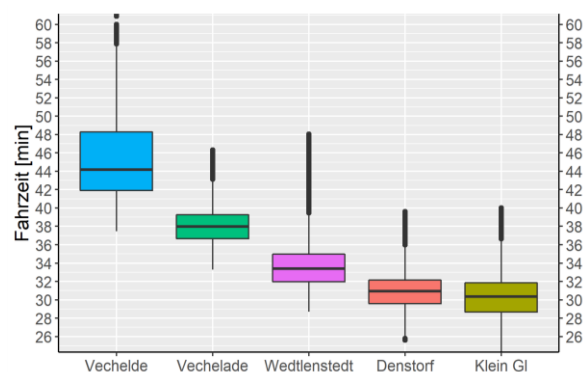
	Richtung Vechede-Braunschweig				Richtung Braunschweig-Vechelde		
	Haltestelle	Fahrzeit [min]	Entfernung [m]		Haltestelle	Fahrzeit [min]	Entfernung [m]
	Vechede Bhf	0	0		Vechede Bhf	1,4	716,6
	Wahler Weg	0,9	716,6		Wahler Weg	0,5	119,2
	Alte Post	0,5	119,2		Alte Post	1,1	739,0
	Taubenstr.	1,2	220,0		-	-	-
	Bürgerzentrum	0,6	350,0		Bürgerzentrum	1,2	827,6
	Bürgerstr.	1,2	827,6		Bürgerstr.	1,2	906,1
	Vogelsang	1,1	906,1		Vogelsang	1,8	1541,7
	Schleusenstr.	1,8	1541,7		Schleusenstr.	0,5	304,5
	Stadtweg	0,5	304,5		Stadtweg	1,9	1813,8
	Denstorf	1,9	1813,8		Denstorf	0,7	540,8
	Klein Gl.	0,8	540,8		Klein Gl.	2,1	2038,3
	Raffturm	2,3	2038,3		Raffturm	2,2	2630,4
	Rosenaeckern	2,3	2630,4		Rosenaeckern	0,6	190,4
	Luftstr.	0,6	190,4		Luftstr.	1,5	551,3
	Hildesheimer	1,6	551,3		Hildesheimer	2,2	553,6
	Rudolfplatz	1,8	553,6		Rudolfplatz	1,0	415,3
	Amalienplatz	1,6	415,3		Amalienplatz	1,8	469,1
	Maschstr.	1,1	469,1		Maschstr.	0,8	354,5
	Radeklint	1,2	354,5		Radeklint	1,1	513,9
	Gueldenstr.	1,2	513,9		Gueldenstr.	1,3	268,6
	Altstadtmarkt	1,0	268,6		Altstadtmarkt	1,0	390,4
	Friedrich-W.-Platz	0,9	339,5		-	-	-
	Friedrich-W.-Str.	0,8	196,5		Hintern Bruedern	0,8	297,4
	Muenzstr.	0,6	180,0		Packhof	0,7	279,9
	Rathaus	1,0	401,9		Rathaus	0	0

Die Route zwischen Vechede Bahnhof und der Haltestelle „Rosenäckern“ (Anfang des städtischen Gebiets) hat eine Länge von 12,1 km und 12 Bushaltestellen. Die restliche Strecke im Stadt-Bereich besitzt eine Länge von 4,4 km und ebenfalls 12 Bushaltestellen. Die Entfernung zwischen den Haltestellen innerhalb geschlossener Ortschaften liegt in 55% der Fälle unter 400 m und einem Minimum von 120 m. Hook und Wright (2007) haben gezeigt, dass Entfernungen zwischen 400 und 500 m die totale Reisezeit der Fahrgäste (Gehzeit zur Haltestelle + Fahrzeit mit dem Bus) minimieren. Geringere Entfernungen führen zu einer ineffizienten Busbeschleunigung und erheblichen Zeitverlusten.

Die Reisezeiten von Tür zu Tür variieren stark wegen der Gehzeit bis zur Haltestelle. Die Tabelle 4-3 zeigt die Fahrzeiten von Zuhause bis zum Rathaus getrennt nach der Gehzeit bis zur Bushaltestelle im jeweiligen Ort und der Fahrzeit mit dem Bus bis zur Endhaltestelle „Rathaus“. Die mittleren Gehzeiten bis zur Haltestelle betragen mit Ausnahme von Vechede ca. fünf Minuten, wobei hohe Standardabweichungen von rund zwei Minuten auftreten. Die mittlere Gehzeit für Vechede liegt bei sieben Minuten mit einer hohen Standardabweichung von vier Minuten. Diese Ergebnisse stellen die typische Situation von vielen Einwohnern im ländlichen Raum dar, wo die Gehzeiten einen signifikanten Anteil der Reisezeiten einnehmen (AHREND und HERGET 2012). Eine Fahrt mit dem Fahrrad zur Bushaltestelle ist heutzutage wegen fehlender Fahrradabstellplätze sehr unpraktisch.

Tabelle 4-3 Buslinie 450: Reisezeiten Tür-zu-Tür

Orte	Gehzeit zur Haltestelle [min]		Fahrzeit zum Rathaus [min]		Reisezeit Tür-zu-Tür [min]	
	Ø	sd	Ø	sd	Ø	sd
Vechelde	7,0	4,0	38,1	0,8	45,1	4,0
Vechelade	4,5	1,8	33,5	0,8	38,0	1,9
Wedtlenstedt	4,0	2,1	29,6	0,8	33,6	2,3
Denstorf	4,7	1,8	26,2	0,7	30,8	1,9
Klein Gl.	5,5	2,1	24,8	0,7	30,3	2,2
Ø= Mittelwert; sd= Standardabweichung						

**Bild 4-19 Buslinie 450: Reisezeit Tür-zu-Tür
Zuhause-Rathaus (eigene Darstellung)**

Im Gegensatz zeigen die Fahrzeiten mit dem Bus 450 kleine Standardabweichungen von knapp einer Minute. Die mittleren Fahrzeiten liegen zwischen 25 und 38 Minuten für Klein Gleidigen bzw. Vechelde.

Die Reisezeit Tür-zu-Tür von dem jeweiligen Zuhause bis zur Endhaltestelle „Rathaus“ betrachtet beide der obengenannten Zeiten. Auf dem Bild 4-19 sind diese Reisezeiten je Ort als Kastenplot gezeigt. Die mittleren Reisezeiten liegen zwischen 30 und 45 Minuten für Klein Gleidigen bzw. Vechelde. Auf dem Bild sind die Variationen, die hauptsächlich auf die Gehzeiten zurückzuführen sind, deutlicher zu sehen.

Wie in Unterkapitel 4.1.2 erwähnt, hat die Buslinie 450 keinen Anschluss an die Orte Wahle und Lamme. Wahle verfügt über keine ÖPNV-Verbindung mit der Stadt. Lamme hingegen ist an die Buslinien 411 und 418 angeschlossen. Da beide Buslinien nicht Kernpunkt dieser Masterarbeit sind, wurden diese nicht simuliert. Die Fahrzeiten von Lamme bis zur Endhaltestelle Rathaus wurden anhand des offiziellen Fahrplans festgelegt. Die Fahrzeit mit der Buslinie 411 beträgt 34 Minuten, während die Fahrt mit der Linie 418 eine Dauer von 27 Minuten hat. Da die Buslinie 418 einen eingeschränkten Fahrplan hat, wurde für die Analyse eine mittlere Fahrzeit von 30 Minuten angenommen. Die Gehzeiten bis zur Bushaltestelle wurden aber mithilfe einer Simulation ermittelt. Die Ergebnisse zeigen eine durchschnittliche Gehzeit von acht Minuten und eine relativ hohe Standardabweichung von vier Minuten.

Um den ÖPNV mit dem motorisierten Individualverkehr zu vergleichen, wurden Fahrten mit dem privaten Pkw zwischen dem jeweiligen Zuhause und dem Rathaus simuliert. Die durchschnittlichen Reisezeiten mit dem Pkw von jedem Ort (Fahrzeit + Parkplatzsuche) sind in der Tabelle 4-4 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen kaum Variationen zwischen den Orten. Die maximale Reisezeit liegt bei 23 Minuten von Vechelde und Wahle und die minimale Reisezeit beträgt 19 Minuten von Denstorf und Lamme.

Tabelle 4-4 Reisezeiten mit dem Pkw und den bestehenden Buslinien nach Ort

Orte	Reisezeit Pkw [min]	Reisezeit ÖPNV [min]	Umfwegfaktor [-]
Vechelde	23	45	1,96
Wahle	23	-	-
Vechelade	22	38	1,70
Wedtlenstedt	21	34	1,57
Denstorf	19	31	1,59
Lamme	19	39	2,05

In der zweiten Spalte der Tabelle sind die durchschnittlichen Reisezeiten mit dem ÖPNV aufgeführt. Um den Unterschied zwischen beiden Mobilitätsformen zu analysieren, wurden die Umwegfaktoren berechnet. Diese drücken das Verhältnis zwischen der Reisezeit mit dem Pkw und dem ÖPNV aus. Alle Faktoren liegen über 1,57, d.h. dass die Fahrten mit dem ÖPNV mindestens 57% länger als mit dem eigenen Auto dauern. Vechelde und Lamme haben mit einem Wert von zwei die höchsten Faktoren, was einer zusätzlichen Fahrzeit von rund 20 Minuten entspricht.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen für die Buslinie 450 hohe Zeitverluste, die hauptsächlich auf die Haltezeiten zurückzuführen sind. Dazu kommen die hohen Gehzeiten zur Bushaltestelle, welche in manchen Fällen zehn Minuten überschreiten. Die Reisezeiten von Tür zu Tür betragen mit dem ÖPNV nach den Simulationen mindestens 60% länger als mit dem privaten Pkw. Diese Ergebnisse sowie die geringe Taktfrequenz von 30 Minuten in den Hauptverkehrszeiten erklären die Unattraktivität des ÖPNV in dem Untersuchungsgebiet.

4.3.3 Simulation der Fuhrparkvarianten der On-Demand-Zubringersysteme

Die drei verschiedenen OD-Zubringersysteme (Vechelde, Denstorf und Lamme) werden in diesem Unterkapitel analysiert. Für jedes System werden die drei verschiedenen Varianten des Fuhrparks untersucht.

Die Simulation erfolgte in SUMO mithilfe eines selbst entwickelten und codierten DARPA-Algorithmus, der in Abschnitt 3.2 erklärt wurde. Dieser Algorithmus sucht anhand der erhaltenen Anfragen an das System die optimale Route für jedes Fahrzeug. Die Anfragen an das System wurden auf Basis einer Schätzung der Nachfrage erzeugt.

Zunächst wird die Nachfrage jedes OD-Zubringersystems geschätzt, danach folgt die Analyse der Ergebnisse.

4.3.3.1 Schätzung der Nachfrage

Die Nachfrage wurde mithilfe des Programms „Ver_Bau“ von Bosserhoff (2012) geschätzt. Anhand des Programms wurde zuerst die Anzahl der Wege pro Tag im Gesamtverkehr für jeden Ort auf Basis der Einwohnerzahlen ermittelt. Alle Orte wurden als Wohngebiete berücksichtigt. In der Tabelle 4-5 (Spalte 1) sind die Wege pro Tag im Gesamtverkehr für jede Ortschaft zusammengeführt, die vollständige Berechnung befindet sich im Anhang 5.

Tabelle 4-5 Modalsplit der Fahrten mit Quelle oder Ziel in Braunschweig nach Ort

OD-System	Ort	Tagesbelastungen im Gesamt-verkehr (1) [W/T]	Q/Z in Braunschweig (2)		Modalsplit					
			%	W/T	MIV (3)		Fahrrad (4)		ÖPNV (BRT-Linie) (5)	
Vechelde	Vechelde	16.492	70%	11.544	55%	6.349	15%	1.732	20%	2.309
	Wahle	3.880	70%	2.716	55%	1.494	15%	407	30%	815
	Vechelade	1.490	70%	1.043	55%	574	15%	156	30%	313
Denstorf	Wedtlenstedt	4.776	75%	3.582	55%	1.970	15%	537	30%	1.075
	Denstorf	2.487	75%	1.865	55%	1.026	15%	280	30%	560
	Klein Gl.	1.102	75%	827	55%	455	15%	124	30%	248
Lamme	Lamme	13.311	80%	10.649	55%	5.857	25%	2.662	20%	2.130

Q/Z: Quelle oder Ziel
W/T: Wege pro Tag

Von dieser Wegeanzahl hat nur ein bestimmter Anteil als Ziel- bzw. Quellverkehr die Stadt Braunschweig (siehe Spalte 2). Die Anteile [%] wurden auf Grundlage der Studie nach GEWOS (2016) gewählt. Für den Modalsplit der Fahrten von oder nach Braunschweig wurde angenommen, dass 55% mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) (Spalte 3), 15% mit dem Fahrrad (Spalte 4) und die restlichen 30% mit der BRT-Linie (Spalte 5) zurückgelegt werden. Als Ausnahme wurde für Vechelde angenommen, dass 20% der Fahrten mit der BRT-Linie zurückgelegt werden und die restlichen 10% mit den regionalen Zügen. Aufgrund der geringeren Entfernung zwischen Lamme und der Stadt wurde in diesem Fall angenommen, dass 25% der Wege mit dem Fahrrad zurückgelegt werden.

Die Fahrten mit der BRT-Linie beinhalten die Fahrten zu/von der Mobilstation. Der Modalsplit von diesen Fahrten ist für jeden Ort in der Tabelle 4-6 gezeigt. Dieser teilt sich in das OD-Zubringersystem (Spalte 2), den motorisierten Individualverkehr als Mitfahrer (Spalte 4), den Radverkehr (Spalte 3) und die Fußgänger (Spalte 5) auf.

Die Anteile für jedes Verkehrsmittel und jeden Ort wurde mit Berücksichtigung der Streckenlänge festgelegt. Die Strecken bis zur Mobilstation haben für die Mehrheit der Ortschaften, mit Ausnahme von Vechelde und Denstorf, eine Länge von ca. zwei Kilometer. Für Fußgänger ist diese Entfernung jedoch zu lang, dementsprechend ist dieses Verkehrsmittel nur in Vechelde und Denstorf möglich. Es wurde angenommen, dass 5% der Fahrgäste bis zur Mobilstation gebracht oder davon abgeholt werden (MIV-Mitfahrer). Für alle Orte wurde ein Anteil von 65% für den Radverkehr gewählt. Dieser Anteil wurde aufgrund verschiedener Analysen des Verkehrsverhaltens in Abhängigkeit der Streckenlänge für die

Stadt Münster (STADT MÜNSTER 2013), Berlin (FEILBACH 2018) und Duisburg (HELMERT und HENNINGER 2016) angenommen. Der verbleibende Anteil von 20 bis 30% wird vom OD-Zubringersystem bedient.

Tabelle 4-6 Modalsplit der Fahrten bis zur/von der Mobilstation nach Ort

OD-System	Ort	BRT-Linie (1) [W/T]	Modalsplit							
			OD-Zubringer (2)		Fahrrad (3)		MIV-Mitfahrer (4)		Fuß (5)	
			Anteil	[W/T]	Anteil	[W/T]	Anteil	[W/T]	Anteil	[W/T]
Vechelde	Vechelde	2.309	20%	462	65%	1.501	5%	115	10%	231
	Wahle	815	30%	244	65%	530	5%	41	0%	0
	Vechelade	313	30%	94	65%	203	5%	16	0%	0
Denstorf	Wedtlenstedt	1.075	30%	322	65%	698	5%	54	0%	0
	Denstorf	560	20%	112	65%	364	5%	28	10%	56
	Klein Gl.	248	30%	74	65%	161	5%	12	0%	0
Lamme	Lamme	2.130	30%	639	65%	1.384	5%	106	0%	0

Um die Nachfrage für jedes Serviceintervall des OD-Zubringersystems zu bestimmen, wurden die Tagesbelastungen in 15-Minuten Intervalle anhand der Ganglinie für „Ortskerngebiete in Unterzentren mit günstiger ÖPNV-Anbindung an einen Ballungsraum“ der EAR 05 (Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs) eingeteilt. Das Bild 4-20 zeigt die Ganglinien für jedes System als die Summe der Ganglinien jeder Ortschaft. Die Ganglinien für jeden Ort sind im Anhang 6 zu sehen.

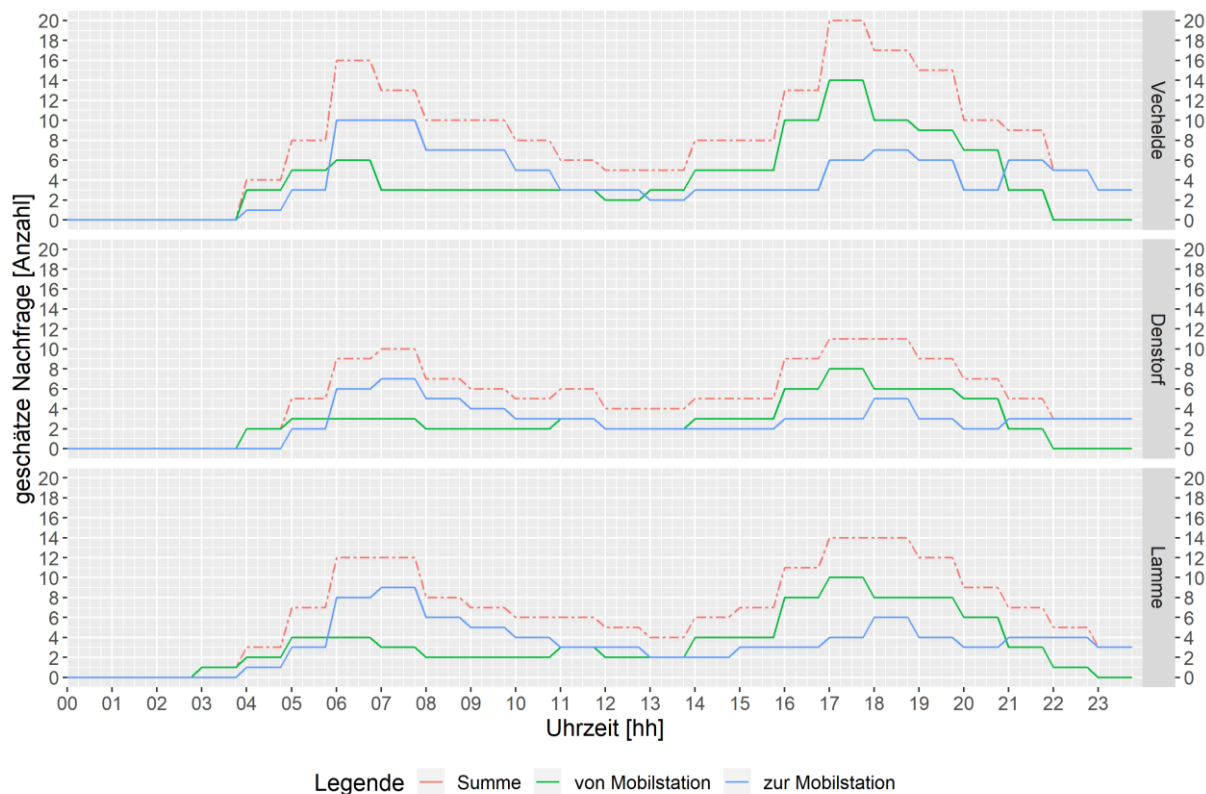


Bild 4-20 Ganglinien der Nachfrage jedes OD-Zubringersystems (15-Minuten-Zeitintervallen)
(eigene Darstellung)

Die Spitzenstunden am Morgen liegen zwischen 6:00 und 8:00 Uhr mit deutlich erhöhter Nachfrage in Richtung Mobilstation, wenn die Einwohner zur Arbeit bzw. Schule fahren. Die Abendspitze bildet sich zwischen 17:00 und 19:00 Uhr mit einer erhöhten Nachfrage in Richtung Wohngebiet. Die maximal zu erwartende Nachfrage wurde für die 15-Minutenintervalle bei 20, 11 und 14 für das OD-Zubringersystem Vechelde, Denstorf bzw. Lamme geschätzt.

Hinsichtlich einer umfangreichen Simulation wurden auf Basis der geschätzten Nachfrage zehn verschiedene Anfragen-Profile für jedes OD-Zubringersystem ermittelt. Die Nachfrage jedes 15-Minuten-Zeitintervalls wurde mithilfe einer Gammaverteilung verändert und so wurde ein neues Anfragen-Profil ermittelt. Für die Verteilung wurde ein Parameter α (Formparameter) von 7,5 angenommen. Der Parameter β (inverser Skalenparameter) wurde so festgelegt, dass der Erwartungswert (α/β) dem Wert der geschätzten Nachfrage entspricht. Die fiktive Anzahl der Anfragen ergibt sich nach einem per Zufall gewählten Perzentil. Im Folgenden werden diese Schritte anhand des Beispiels der Nachfrage um 6:00 Uhr in Lamme mit einem Wert von 12 erklärt (siehe Bild 4-21).

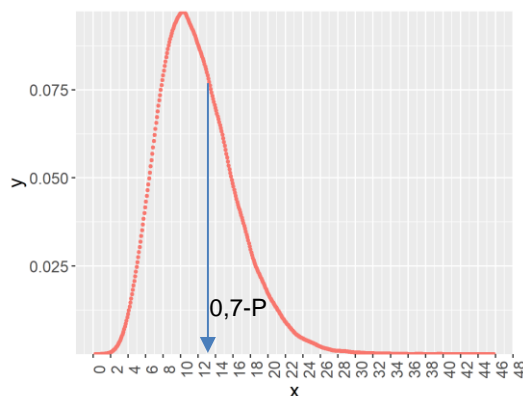


Bild 4-21 Gammaverteilung ($\alpha=7,5$; $\beta=0,625$)
(eigene Darstellung)

1. Gammaverteilung mit $\alpha = 7,5$ und $\beta = 0,625$ (Erwartungswert $\alpha/\beta = 12$).
2. Ein Perzentil wird zufällig gewählt: 0,7.
3. Der Wert in der Gammaverteilung für dieses Perzentil entspricht: 13.

Infolgedessen wird das OD-Zubringersystem Lamme um 6:00 Uhr für dieses Profil 13 Anfragen haben.

Da die Anfragen von dem jeweiligen Zuhause zur Mobilstation (oder in Gegenrichtung) gestellt werden, ist es schließlich erforderlich die Lage des jeweiligen Zuhauses festzulegen. Alle Betriebsgebiete zeigen eine gleichmäßige Einwohnerdichte ohne punktuelle Belastungen. Aus diesem Grund wurde für jede Anfrage eine zufällige Adresse in dem Betriebsgebiet als Zuhause gewählt. Die Anfrage-Profile für jeden Ort befinden sich im Anhang 7.

4.3.3.2 Ergebnisse

Für jedes OD-Zubringersystem wurden die drei Varianten des Fuhrparks mithilfe des DARPA-Algorithmus simuliert. Die Variante 1 sieht die Anwendung eines Elektro-Kleinbusses (Kapazität 12 Personen) vor. Die Variante 2 hat einen Fuhrpark von zwei Elektroautos

(Kapazität von je sechs Personen), während die Variante 3 die Anwendung von einem Elektro-Kleinbus und einem Elektroauto analysiert. Die verwendeten Parameter für die Simulation der beiden Fahrzeugmodelle sind im Anhang 2 zu sehen.

Das Serviceintervall liegt bei 15-Minuten mit einer maximalen Fahrzeit jedes Fahrzeuges von 13 Minuten (siehe Abschnitt 4.2.3.2). Basierend auf den Werten für Mini-Busse aus einer Studie von Hook und Wright (2007) wurden für die Haltezeit 15 Sekunden angenommen.

Jede Variante wurde ebenfalls mit den zehn verschiedenen Profilen der Anfragen analysiert. Auf dem Bild 4-22 ist die Anzahl der simulierten Serviceintervalle für nur eine Fuhrparkvariante zu sehen. So wurden z.B. für das OD-Zubringersystem Vechelde 135 Serviceintervalle mit sechs erhaltenen Anfragen simuliert.

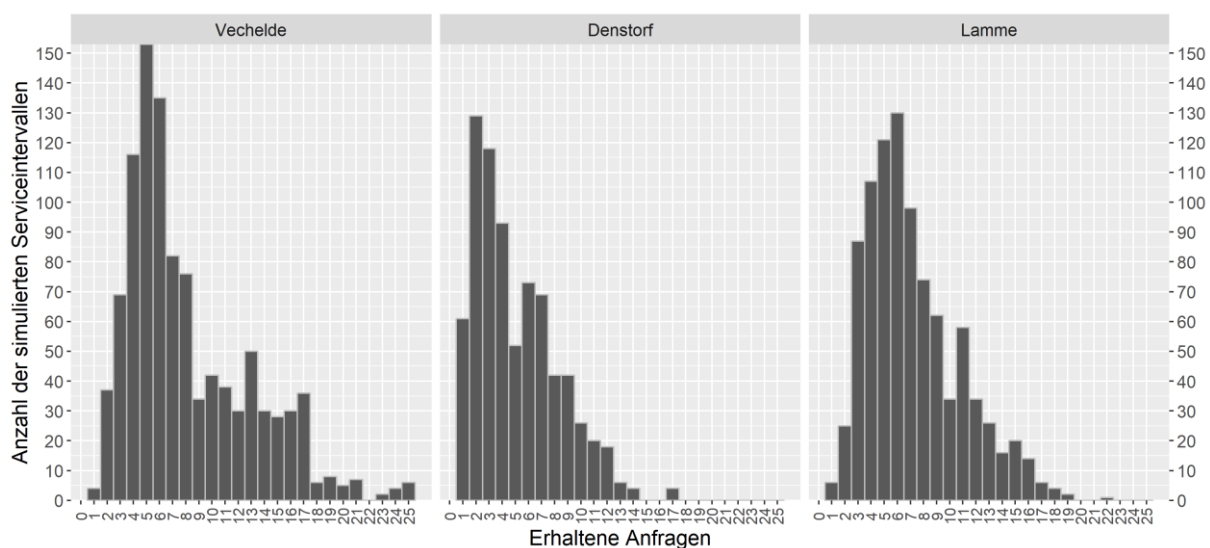


Bild 4-22 Anzahl der simulierten Serviceintervalle abhängig der erhaltenen Anfragen

Insgesamt wurden für jede Variante jedes OD-Zubringersystems über 600 Serviceintervalle simuliert. Im digitalen Anhang 8 befinden sich die Input- sowie Output-Dateien der Simulationen. Im Folgenden werden die Ergebnisse für jedes OD-Zubringersystem vorgestellt.

OD-Zubringersystem Vechelde

Das OD-Zubringersystem Vechelde bedient Vechelde, Wahle und Vechelade. Die höchste simulierte Anfrage an das System ist 25, wobei die meisten Fälle zwischen zwei und 17 Anfragen liegen (siehe Bild 4-22).

Um die Kapazität des Systems zu schätzen, wurde das Verhältnis erhaltene-abgelehnte Anfragen analysiert und die maximale Anzahl der bedienten Anfragen abhängig von der Anzahl der erhaltenen Anfragen bestimmt. Die Ergebnisse sind auf dem Bild 4-23 gezeigt. Das oberste Diagramm zeigt die Anzahl der abgelehnten Anfragen gemäß der erhaltenen für jede Variante. Jeder Punkt in dem Diagramm stellt ein Serviceintervall des Systems dar. Für eine Anzahl von zehn erhaltenen Anfragen wurde für die Variante 1 (rosa Punkt), die Variante 2 (grüner Punkt) sowie die Variante 3 (blauer Punkt) nur in einem simulierten Serviceintervall

zwei Anfragen abgelehnt. Das untere Diagramm zeigt die maximale Anzahl an bedienten Anfragen gemäß der erhaltenen für jede Variante. Für den Fall von zehn erhaltenen Anfragen liegt die maximale Anzahl an bedienten Anfragen für die Variante 1 (rosa Balken) bei acht und bei zehn für die Varianten 2 und 3 (grüner bzw. blauer Balken).

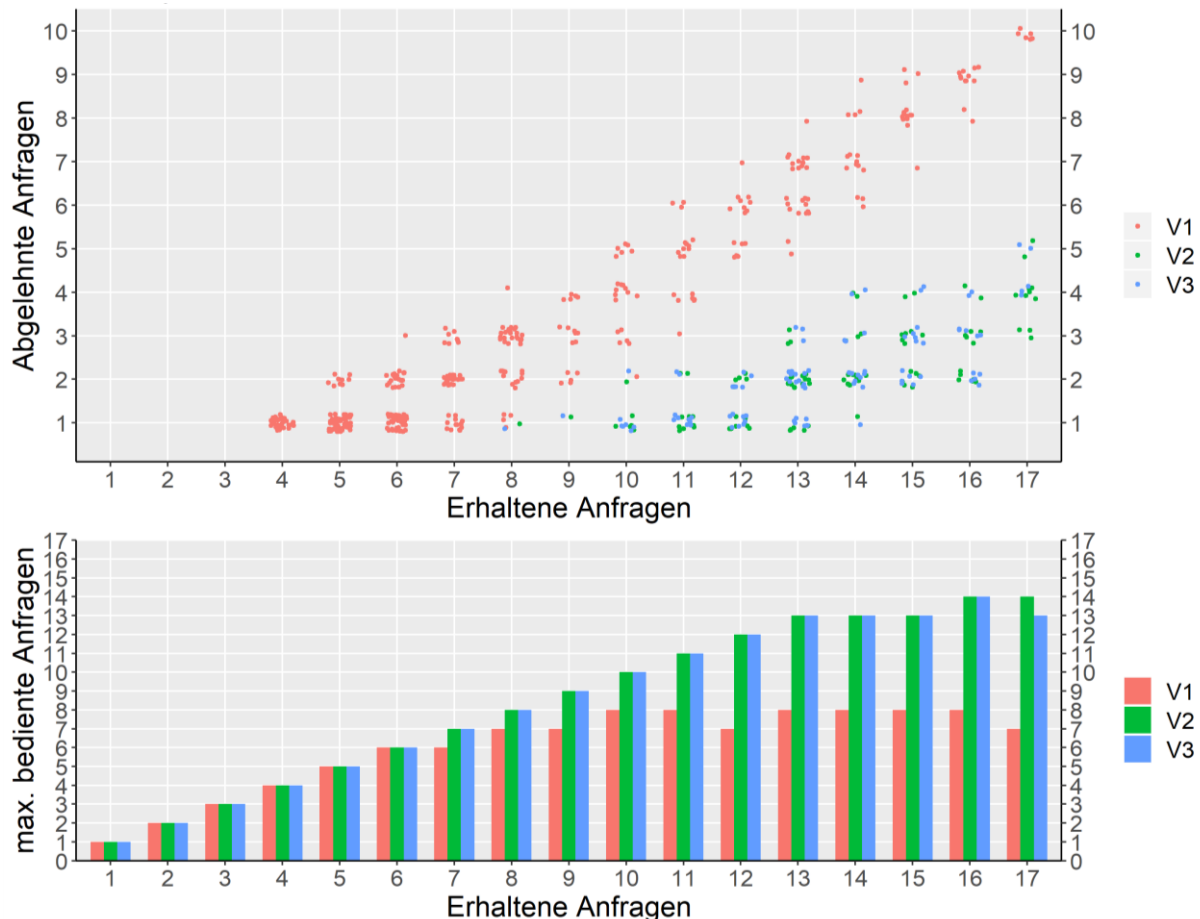


Bild 4-23 OD-Zubringersystem Vechelde: Kapazitätsanalyse (V: Variante) (eigene Darstellung)

Die Variante 1 zeigt eine niedrige Leistung, weil schon ab vier Anfragen Ablehnungen gemacht werden müssen. Die maximale Kapazität des Systems für ein Serviceintervall liegt für diese Variante bei acht Fahrgästen. Die Varianten 2 und 3 zeigen eine ähnliche Leistung. Ab zehn Anfragen fängt das System an Schwierigkeiten zu haben, alle Anfrage zu bedienen. Beide Varianten zeigen eine maximale Kapazität von 14 Anfragen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung von einem einzelnen Fahrzeug nicht effizient ist. Die Nutzung von zwei Fahrzeugen erhöht die Kapazität des Systems deutlich, indem die Passagiere besser nach dem Abhol- und Zielpunkt aufgeteilt werden können. Gleichzeitig kann anhand der Variante 3 entnommen werden, dass Fahrzeuge mit hoher Kapazität nicht vollständig ausgenutzt werden können. Das liegt daran, dass die Kapazität des Systems nicht nur von der Kapazität des Fahrzeuges abhängt, sondern auch stark durch die Lage der Abhol- und Zielpunkte und durch das Verhältnis zwischen den Anfrage-Richtungen (von/zur Mobilstation) eingeschränkt wird.

Für die Varianten 2 und 3 wurde zusätzlich analysiert, wie oft und in welchen Fällen jedes Fahrzeug benutzt wird (siehe Bild 4-24 a bzw. b). Die Graphen stellen die Anzahl der simulierten Serviceintervalle dar, wo ein einzelnes Fahrzeug oder beide Fahrzeuge benutzt wurden. Für die Variante 2 wurde für drei bediente Anfragen in allen ca. 70 simulierten Serviceintervallen nur ein Elektroauto benutzt, wobei für vier bediente Anfragen ein einziges Elektroauto in ca. 60 simulierten Serviceintervallen benutzt wurde und in den ca. 25 restlichen Fällen beide Fahrzeuge verwendet wurden.

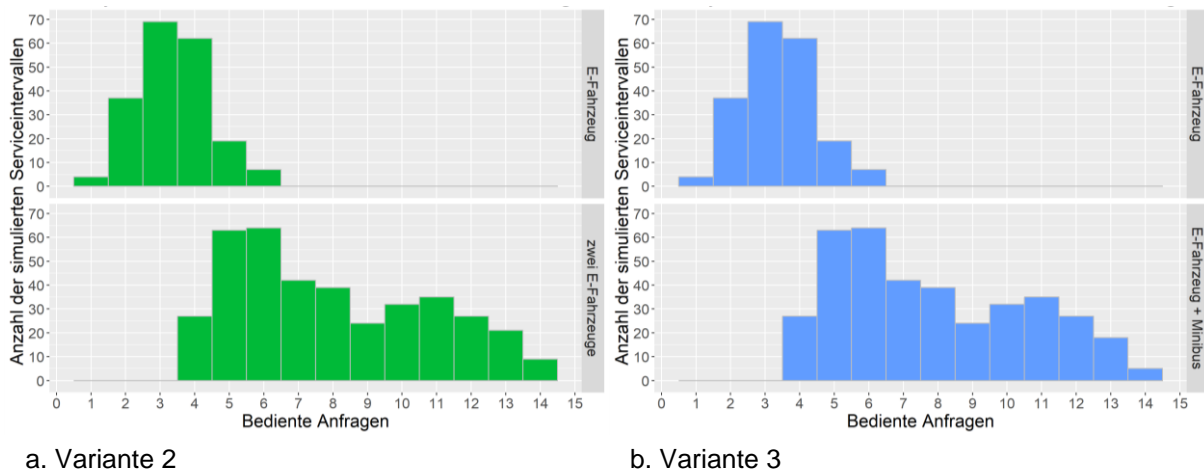


Bild 4-24 OD-Zubringersystem Vechelde: Nutzung von Fahrzeugen (eigene Darstellung)

Beide Varianten fangen ab vier Anfragen an, beide Fahrzeuge zu benutzen. Diese Ergebnisse waren zu erwarten, da die Variante 1 mit nur einem Kleinbus auch ab vier Anfragen Probleme gezeigt hat.

In beiden Varianten konnte ein einziges E-Fahrzeug nur eine maximale Anzahl von sechs Anfragen bedienen. Ab sieben bedienten Anfragen wurden für alle simulierten Serviceintervalle beide Fahrzeuge verwendet. Der Kleinbus in der Variante 3 wurde für kein Serviceintervall allein verwendet. Dies zeigt wiederum, dass die hohe Passagier-Kapazität dieses Fahrzeuges nicht voll ausgenutzt werden kann.

Auf dem Bild 4-25 sind die Fahrzeiten (ohne Haltezeiten) von jedem Serviceintervall als Kastenplot dargestellt. Wenn für ein Serviceintervall zwei Fahrzeuge verwendet werden, dann stellt die Fahrzeit in dem Diagramm die Summe der Fahrzeit der Fahrzeuge dar. Für fünf bediente Anfragen zeigt die Variante 1 (rosa Kasten) einen Median von neun Minuten, wobei die Varianten 2 und 3 (grüner bzw. blauer Kasten) einen Median von 12 Minuten haben.

Die Schwankungen in der Fahrzeit sind mitunter sehr hoch, mit Werten z.B. für sieben bediente Anfragen zwischen zehn und über 18 Minuten. Dies macht die Schätzung der Betriebskosten der OD-Zubringersysteme sehr schwierig.

Die totalen Fahrzeiten der Varianten 2 und 3 sind bis zu 11 bedienten Anfragen gleich. Ab 12 bedienten Anfragen unterscheiden sich diese um ein paar Sekunden.

Die Nutzung von einem Minibus in der Variante 3 zeigt in Betrachtung der Fahrzeiten auch keine Vorteile im Vergleich mit der Variante 2.

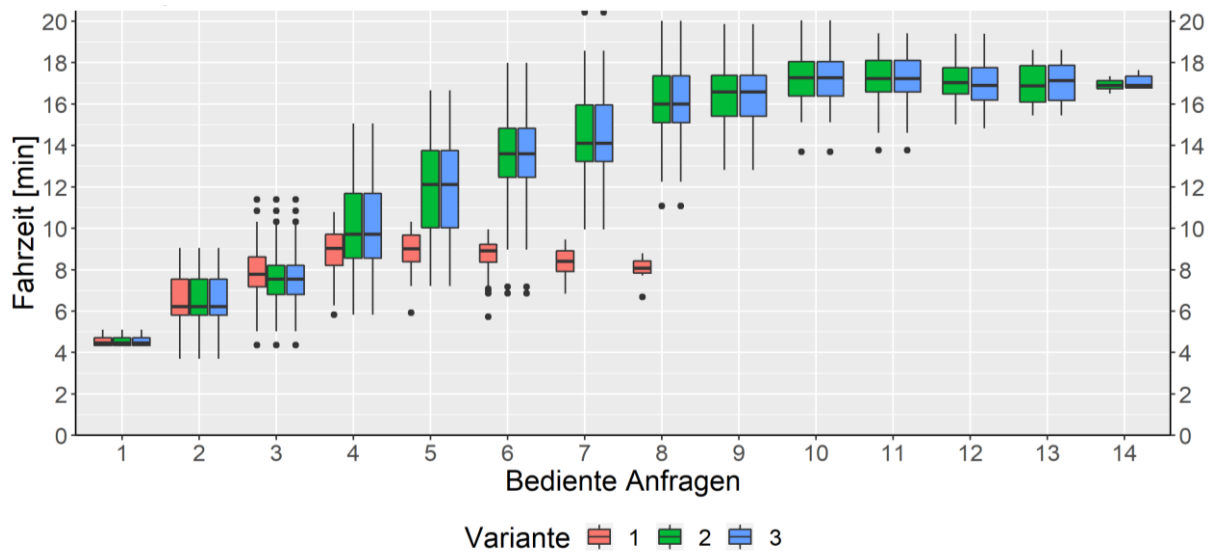


Bild 4-25 OD-Zubringersystem Vechelde: Fahrzeit (eigene Darstellung)

Auf Basis der Ergebnisse ist die Variante 2 mit zwei Elektroautos die am besten geeignete für das OD-Zubringersystem Vechelde. Auf dem Bild 4-26 ist die Leistung dieser Variante im Vergleich mit den geschätzten Nachfragen (beide Richtungen) dargestellt.

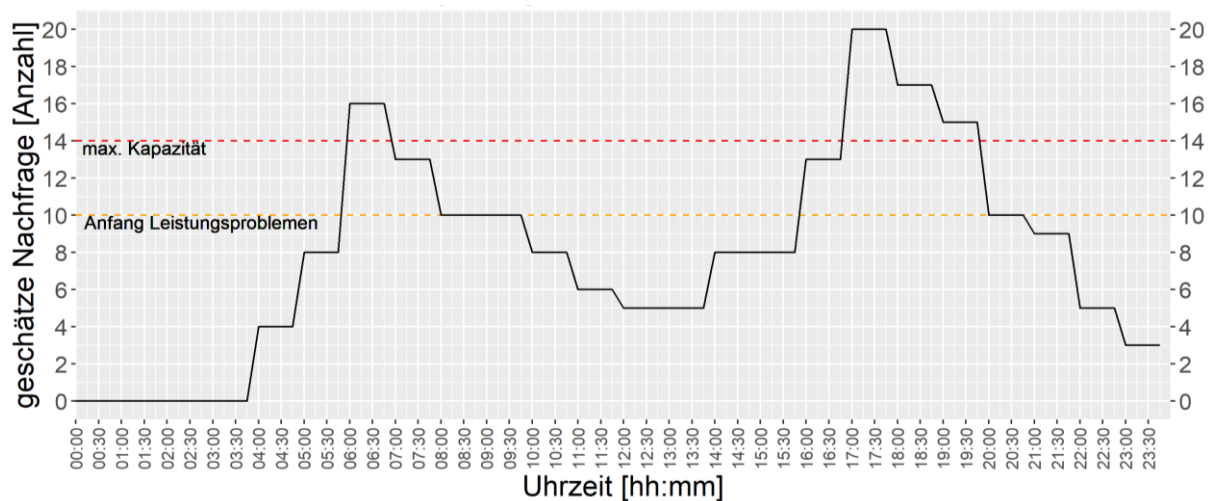


Bild 4-26 OD-Zubringersystem Vechelde: Leistung der gewählten Variante (eigene Darstellung)

Wie zu erkennen ist, wird das System in den Spitzenstunden überlastet sein. Aus diesem Grund ist für das OD-Zubringersystem Vechelde ein Fuhrpark mit drei Elektroautos zu empfehlen.

OD-Zubringersystem Denstorf

Denstorf, Klein Gleidigen und Wedtlenstedt werden von dem OD- Zubringersystem Denstorf bedient. Die maximale simulierte Anzahl der Anfragen liegt bei 14, wobei die meisten Fällen zwischen eins und 12 Anfragen liegen (siehe Bild 4-22).

Die Kapazitätsanalyse dieses Betriebsgebiets ist auf dem Bild 4-27 dargestellt. Die Variante 1 (in Rosa) zeigt wieder ab geringen Anfragen Leistungsprobleme. Für zwei Serviceintervalle mit vier erhaltenen Anfragen musste eine abgelehnt werden (siehe erstes Diagramm). Die maximale Kapazität dieser Variante liegt bei neun (siehe zweites Diagramm).

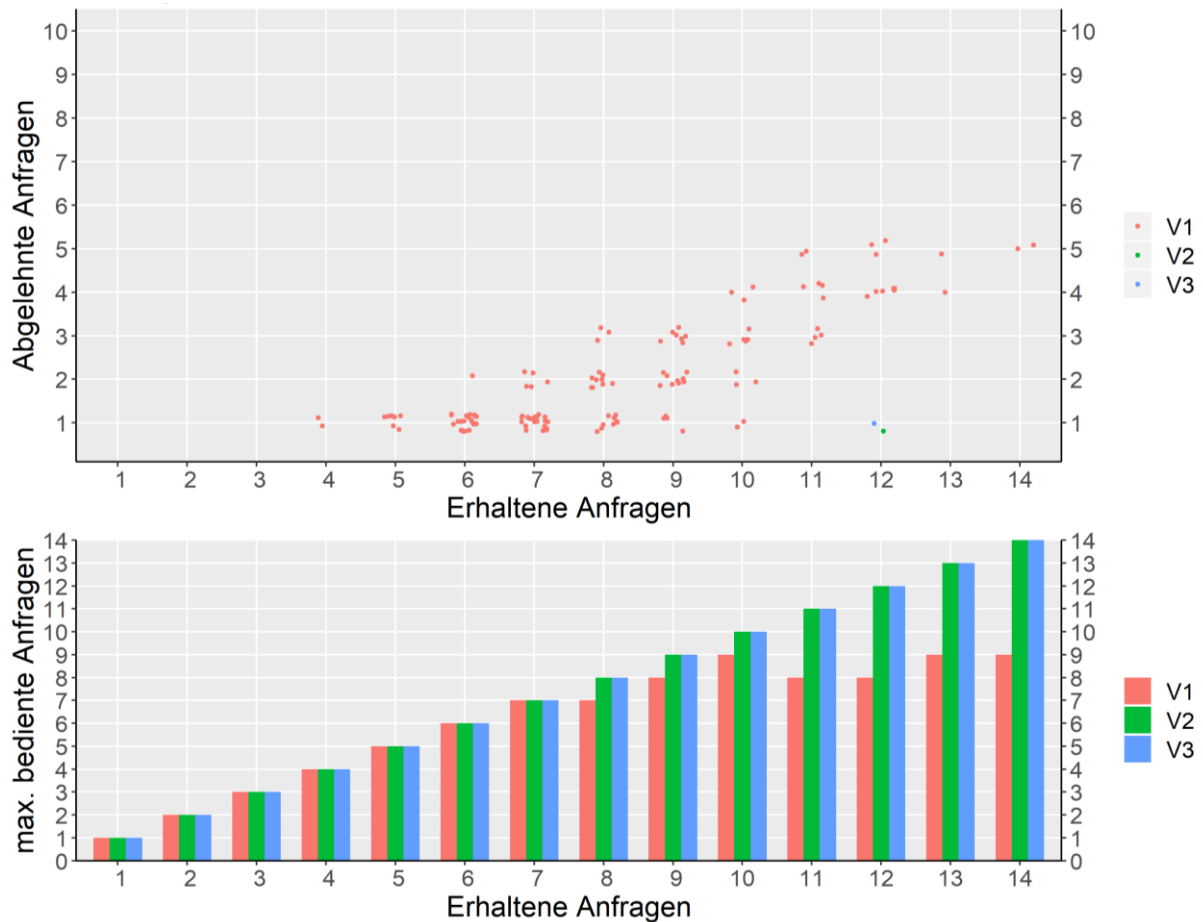


Bild 4-27 OD- Zubringersystem Denstorf: Kapazitätsanalyse (V: Variante) (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der Varianten 2 und 3 (in Grün bzw. Blau) haben bei diesem Betriebsgebiet nur für ein einziges Serviceintervall mit 12 erhaltenen Anfragen Leistungsprobleme gezeigt. Die maximale Kapazität von beiden Varianten konnte bei der Analyse nicht festgelegt werden. Die wird aber bei bzw. über 14 Anfragen liegen (siehe zweites Diagramm).

Die Verbesserung der Leistung des Systems bei den drei Varianten im Vergleich mit dem OD-Zubringersystem Vechelde ist hauptsächlich auf die reduzierten Entfernungen für dieses Betriebsgebiet zurückzuführen.

Auf dem Bild 4-28 ist die Nutzung von jedem Fahrzeug in den Varianten 2 und 3 dargestellt. Ein einziges Elektroauto wird für beide Varianten bis maximal sieben bediente Anfragen verwendet. Zwischen vier und sieben bedienten Anfragen werden für manche Serviceintervalle zwei Fahrzeuge benutzt. Ab acht Anfragen müssen in beiden Varianten zwei Fahrzeuge benutzt werden.

Der Minibus der Variante 3 konnte auch in diesem System nicht allein verwendet werden. Dies zeigt erneut die Unmöglichkeit, seine Kapazität vollständig zu nutzen.

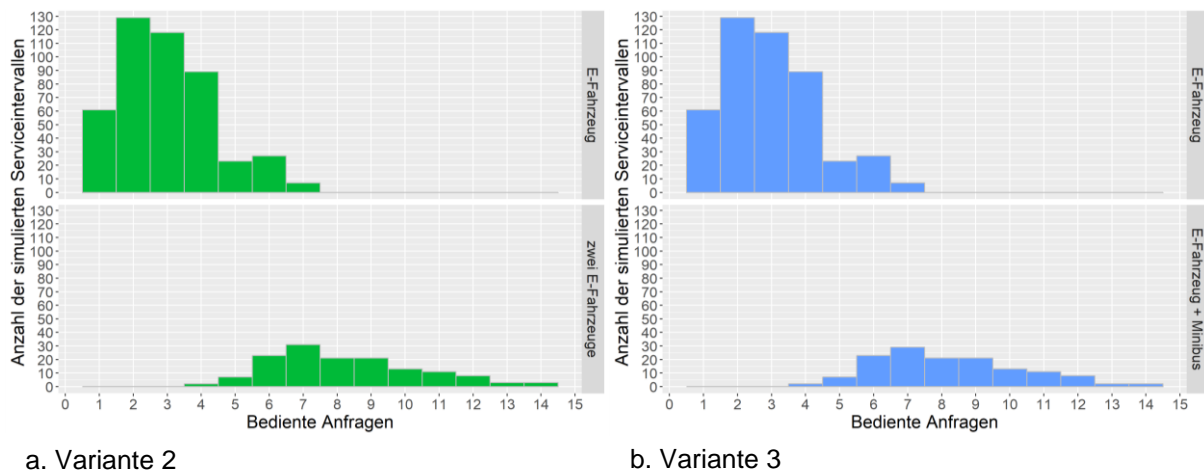


Bild 4-28 OD-Zubringersystem Denstorf: Nutzung von Fahrzeugen (eigene Darstellung)

Die Fahrzeit für jedes simulierte Serviceintervall ist auf dem Bild 4-29 zu sehen. Die rosa Kästen stellen die Ergebnisse der Variante 1 dar, die grünen Kästen zeigen die Variante 2 und die Variante 3 ist in blauen Kästen schematisiert. Die Fahrzeiten variieren zwischen vier und 19 Minuten in Abhängigkeit der bedienten Anfragen.

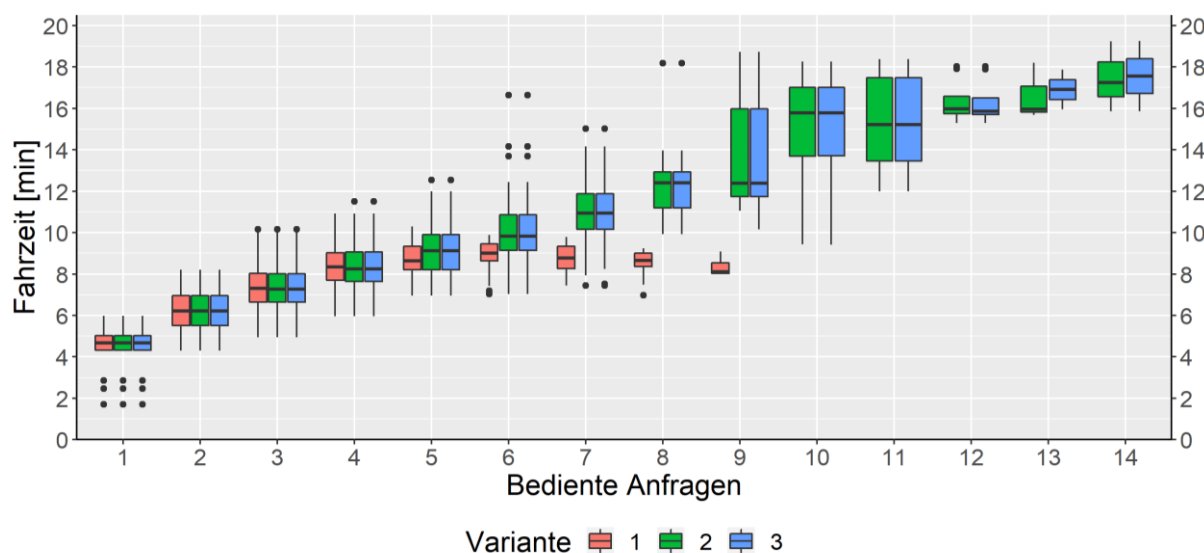


Bild 4-29 OD-Zubringersystem Denstorf: Fahrzeit (eigene Darstellung)

Die Variante 1 zeigt ab vier bedienten Anfragen geringere Fahrzeiten als die anderen Varianten, weil ab vier Anfragen zwei Fahrzeuge für die Variante 2 und 3 benutzt werden. Zwischen den Varianten 2 und 3 zeigen sich wieder kaum Unterschiede. In diesem Fall sind die Abweichungen der Fahrzeiten bis zu acht Anfragen deutlich geringer als in dem System Vechelde. Dies liegt erneut an den Eigenschaften des Straßennetzes in diesem Betriebsgebiet.

Aufgrund der Analyse der Ergebnisse wird für das OD-Zubringersystem Denstorf ebenfalls die Variante 2 empfohlen. Auf dem Bild 4-30 ist die Leistung dieser Variante dargestellt. In diesem Fall zeigt das OD-System für die geschätzte Nachfrage keine Leistungsprobleme.

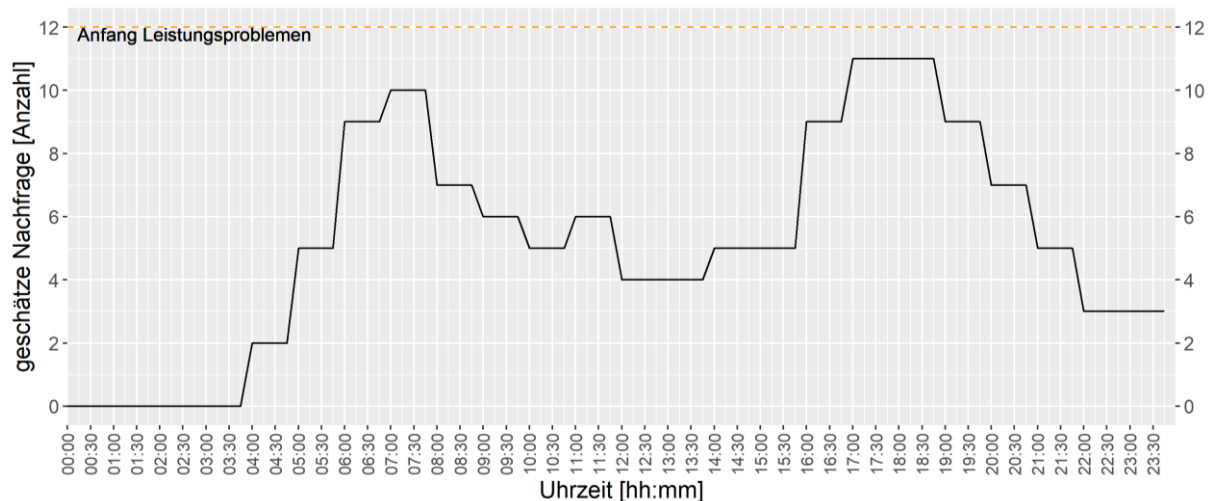


Bild 4-30 OD-Zubringersystem Denstorf: Leistung der gewählten Variante (eigene Darstellung)

OD- Zubringersystem Lamme

Die Mehrheit der simulierten Serviceintervalle für das OD-Zubringersystem Lamme liegen zwischen zwei und 13 erhaltenen Anfragen. Die maximale Anzahl von simulierten Anfragen an das System liegt bei 22 (siehe Bild 4-22).

Die Variante 1 (in Rosa auf dem Bild 4-31) zeigt für dieses Zubringersystem erneut Einschränkungen ab vier Anfragen und eine maximale Kapazität von neun Anfragen.

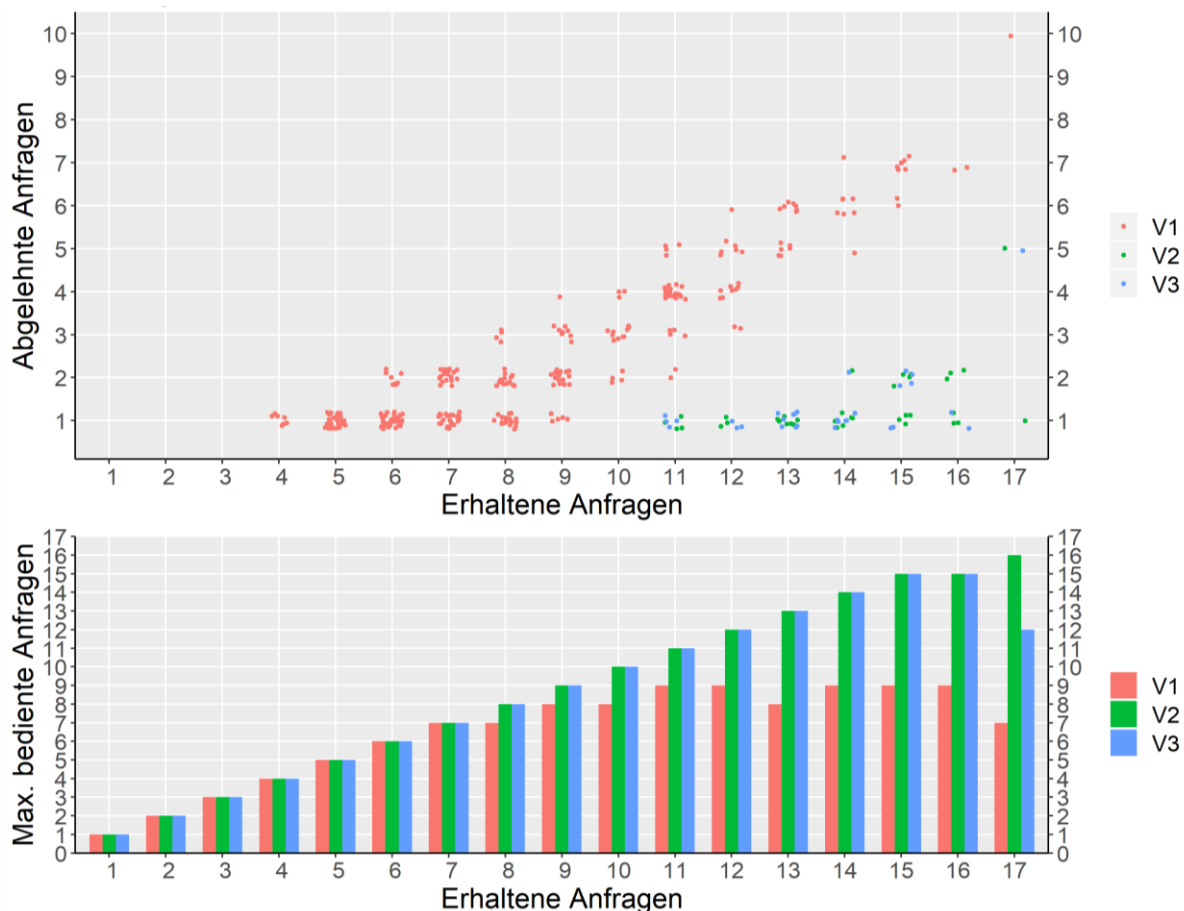


Bild 4-31 OD- Zubringersystem Lamme: Kapazitätsanalyse (V: Variante) (eigene Darstellung)

In der Variante 2 (in Grün) und 3 (in Blau) müssen Ablehnungen erst ab 11 Anfragen gemacht werden. Die maximale Kapazität der Variante 3 liegt bei 15. In dem Fall der Variante 2 wurde bei einem einzigen Serviceintervall mit 17 erhaltenen Anfragen eine maximale Kapazität von 16 erreicht. Dies war jedoch ein Sonderfall mit mehreren nah beieinander liegenden Anfragen und ist dementsprechend nicht zu berücksichtigen. Infolgedessen liegt die maximale Kapazität der Variante 2 auch bei 15.

Das Bild 4-32 stellt die Nutzung der Fahrzeuge für die Variante 2 und 3 dar. Der Minibus der Variante 3 konnte in diesem Zubringersystem ebenfalls nicht allein verwendet werden.

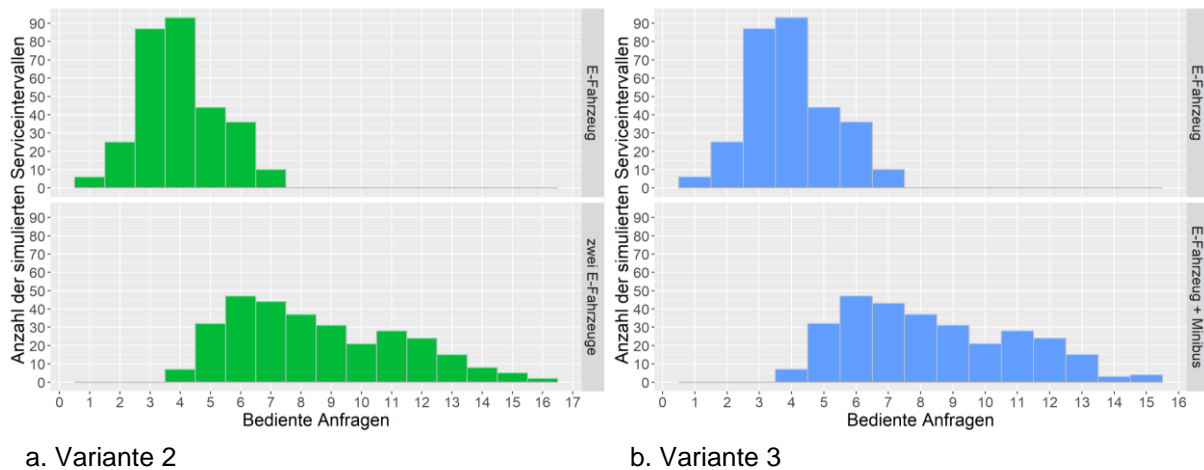


Bild 4-32 OD-Zubringersystem Lamme: Nutzung von Fahrzeugen (eigene Darstellung)

Die Nutzung von zwei Fahrzeugen fängt in beiden Varianten ab vier bedienten Anfragen an. Ein einziges Elektroauto konnte bis maximal sieben bediente Anfragen verwendet werden. Die Fahrzeiten jedes Serviceintervalls zeigen ein ähnliches Bild wie das OD-Zubringersystem Vechelde mit starken Variationen für eine geringe Anfragenanzahl (siehe Bild 4-33).

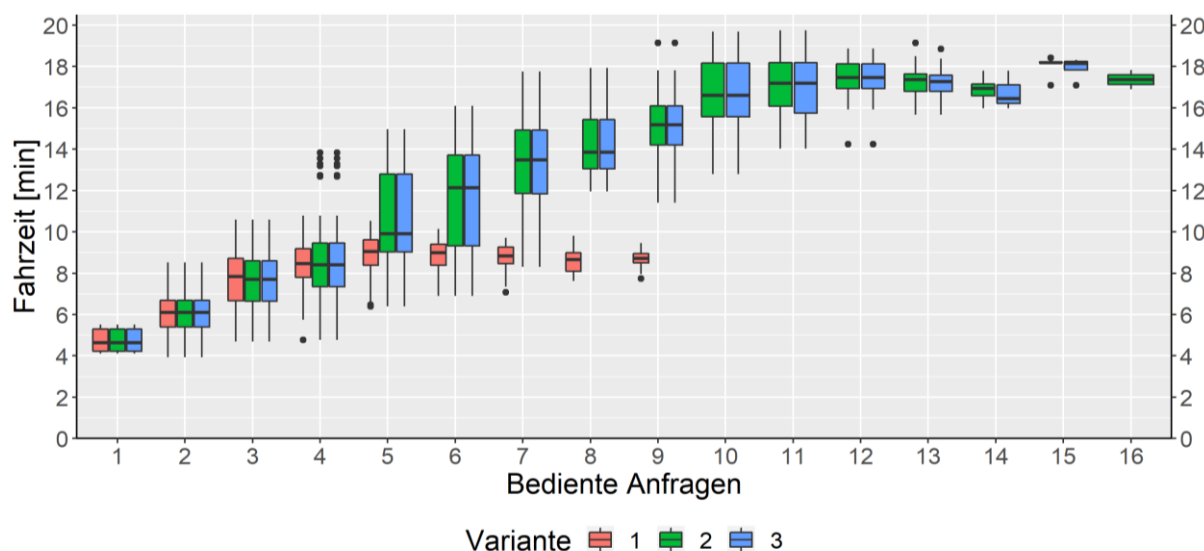


Bild 4-33 OD-Zubringersystem Lamme: Fahrzeit (eigene Darstellung)

Die drei Varianten zeigen bis drei bediente Anfragen keine Unterschiede, da für alle die gleichen optimalen Fahrten gefunden wurden. Ab vier bedienten Anfragen unterscheidet sich

die Variante 1 (in Rosa) von den anderen zwei. Die Zeitunterschiede zwischen der Variante 2 und 3 (grüner bzw. blauer Kasten) sind wie bei den anderen zwei OD-Zubringersysteme unerheblich.

In Betrachtung der Ergebnisse ist für das OD-Zubringersystem Lamme die Variante 2 mit zwei Elektroautos zu empfehlen. Auf dem Bild 4-34 ist die Leistung dieser Variante mit der geschätzten Nachfrage des Systems dargestellt.

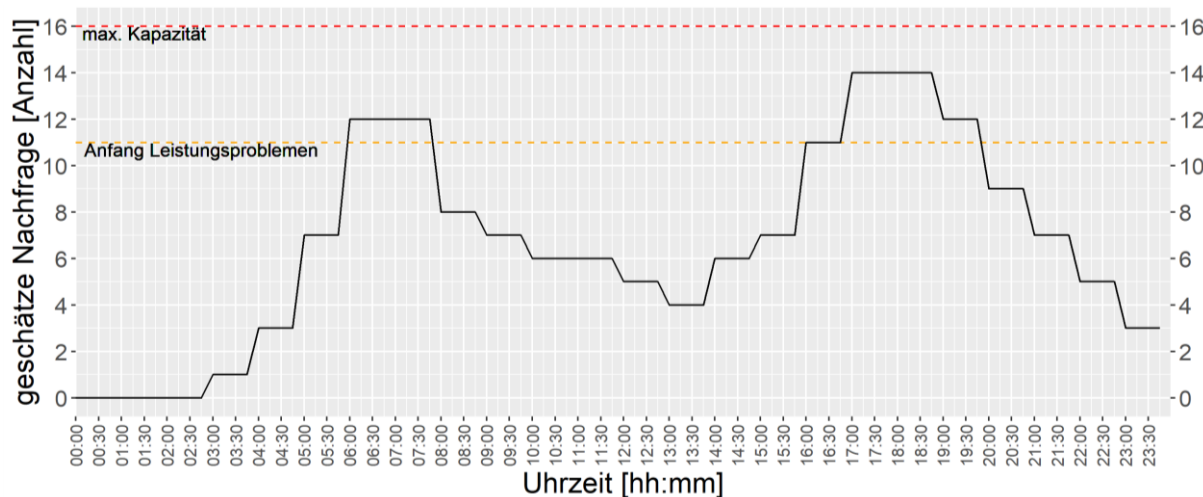


Bild 4-34 OD-Zubringersystem Lamme: Leistung der gewählten Variante (eigene Darstellung)

In der Morgen- und Abendspitze könnte das System Leistungsprobleme zeigen. Die Anwendung eines dritten Fahrzeuges ist aber nicht empfehlenswert. Falls für ein Serviceintervall nicht alle Anfragen Tür-zu-Tür bedient werden können, können für neue Buchungen bereits geplanten Haltestellen angeboten werden. Der Benutzer wird dann aber eine relativ längere Strecke zu Fuß gehen müssen. Andernfalls wird der Benutzer bis zum nächsten möglichen Serviceintervall warten müssen.

4.3.4 Trunk-and-Feeder-System (Szenario 1)

Das Szenario simuliert das vorgeschlagene Trunk-and-Feeder-System, d.h. das BRT-System und die gewählten Varianten der drei OD-Zubringersysteme.

Die Lage der Mobilstationen sowie der Fahrplan und die Fahrzeuge des BRT-Systems wurden auf Basis der Bestimmungen in den Abschnitten 4.2.1 bzw. 4.2.2 modelliert. Die OD-Zubringersysteme wurden nach den Auswertungen der Ergebnisse des Abschnitts 4.3.3 mit drei Elektroautos im Fall von Vechelde und zwei Elektroautos für die Zubringersysteme Denstorf und Lamme simuliert. Diese Systeme wurden mithilfe der generierten SUMO-Datei von dem DARF-Algorithmus in dem Szenario hinzugefügt.

Um die intermodalen Fahrten mit dem nichtmotorisierten Individualverkehr plus ÖPNV zu analysieren, wurde eine Vielzahl von Radfahrten zwischen dem jeweiligen Zuhause und der

entsprechenden Mobilstation simuliert. Der Anfangspunkt (Zuhause) wurde zufällig auf dem Verkehrsnetz ausgewählt.

Die Fahrzeugparameter zur Simulation der E-Gelenkbusse der BRT-Linie, der Elektroautos der OD-Zubringersysteme sowie die Parameter für die Simulation der Fahrräder befinden sich im Anhang 2. Der Energiebedarf der E-Gelenkbusse sowie Elektroautos wurde mithilfe der Modelle von Kurczveil, López, und Schnieder (2013) simuliert.

Die Haltestellenaufenthaltszeiten des BRT-Systems wurden basierend auf den Ergebnissen von verschiedenen BRT-Systemen, die bereits im Betrieb sind, auf 15 Sekunden festgelegt (HINEBAUGH und TANN 2009; HOOK und WRIGHT 2007; LEVINSON U. A. 2003).

Um repräsentative Werte zu erhalten, wurden zehn Simulationen durchgeführt. Die Dateien für die SUMO-Simulation des Szenarios sowie die Ergebnisse und eine kurze 2D-Aufnahme der Simulation für einen besseren Überblick befinden sich im digitalen Anhang 9. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen vorgestellt.

4.3.4.1 Ergebnisse

Die Simulationen zeigen einen guten Betrieb von dem BRT-System und den OD-Zubringersystemen sowie die Verbindung zwischen beiden. Alle simulierten Fahrgäste haben ihren Anschluss rechtzeitig erreicht. Insgesamt wurden die Fahrten von 1.067 Fahrgästen simuliert.

Die Umlaufzeit der BRT-Linie, ohne Berücksichtigung der Wendezeiten, beträgt im Durchschnitt 49,5 Minuten. Auf dem Bild 4-35 ist die Dichteverteilung der Umlaufzeit sowie die Anteile der Zeitverluste dargestellt.

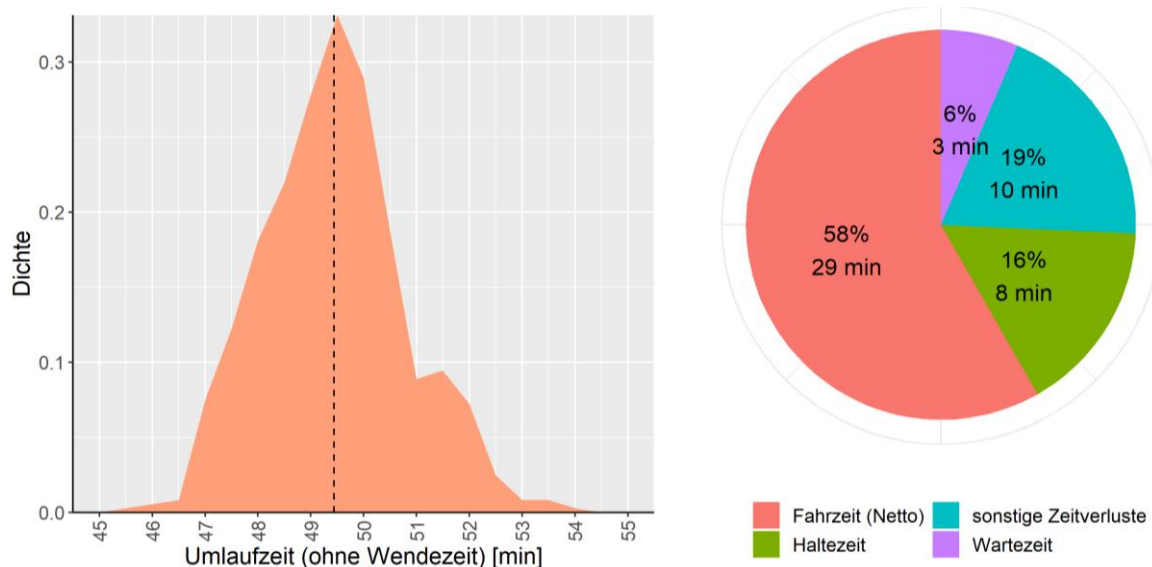


Bild 4-35 BRT-Linie: Umlaufzeit und ihre Zeit-Komponenten (eigene Darstellung)

Obwohl die Umlaufzeit zwischen 45 und 54 Minuten variiert, beträgt die Standardabweichung nur eine Minute.

Die Zeitverluste liegen bei 41% der Umlaufzeit. Dies bedeutet, dass in 58% der Zeit (29 Minuten) die Busse ohne Störungen verkehren. Aufgrund der Umschaltung der Lichtsignalanlagen zur bedarfsgerechten Steuerung betragen die Wartezeiten nur drei Minuten (6% der Zeit). Die Haltezeiten und sonstigen Zeitverluste entstehen hauptsächlich in der Innenstadt und machen zusammen 18 Minuten (35%) aus.

Die Variation der Fahrzeiten in Abhängigkeit der Abfahrtszeit ist geringfügig. Auf dem Bild 4-36 sind die Fahrzeiten in jeder Richtung (BV= Braunschweig-Vechelde und VB= Vechelde-Braunschweig) als Kastenplot dargestellt.

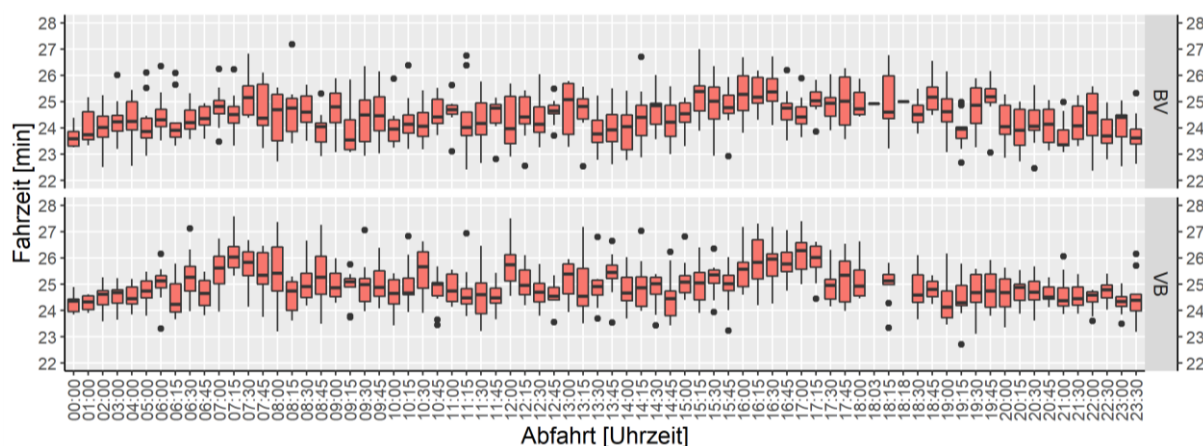


Bild 4-36 BRT-Linie: Fahrzeiten nach Abfahrtszeit und Fahrtrichtung (eigene Darstellung)

Die Fahrt vom Bahnhof Vechelde bis zum Rathaus hat eine Länge von 16,3 km, während die Gegenrichtung Rathaus-Vechelde Bhf. eine Länge von 14,5 km hat. Die Dauer beider Strecken beträgt im Durchschnitt je 25 Minuten.

Die Ersetzung von den konventionellen Haltestellen in dem Untersuchungsgebiet durch die drei Mobilstationen haben die Busbeschleunigung deutlich verbessert. In der Tabelle 4-7 sind die Entfernungen sowie Fahrzeiten zwischen den neuen Haltestellen der BRT-Linie bis zur Zwischenhaltestelle „Rosenäckern“ zusammengefasst. Da keine Änderungen auf dem Linienverlauf im Stadt-Gebiet (ab der Haltestelle Rosenäckern) gemacht wurden, wurde diese Information nicht dieser Tabelle hinzugefügt (siehe dafür die Tabelle 4-2).

Tabelle 4-7 BRT-Linie: Fahrzeiten und Entfernungen zwischen Haltestellen

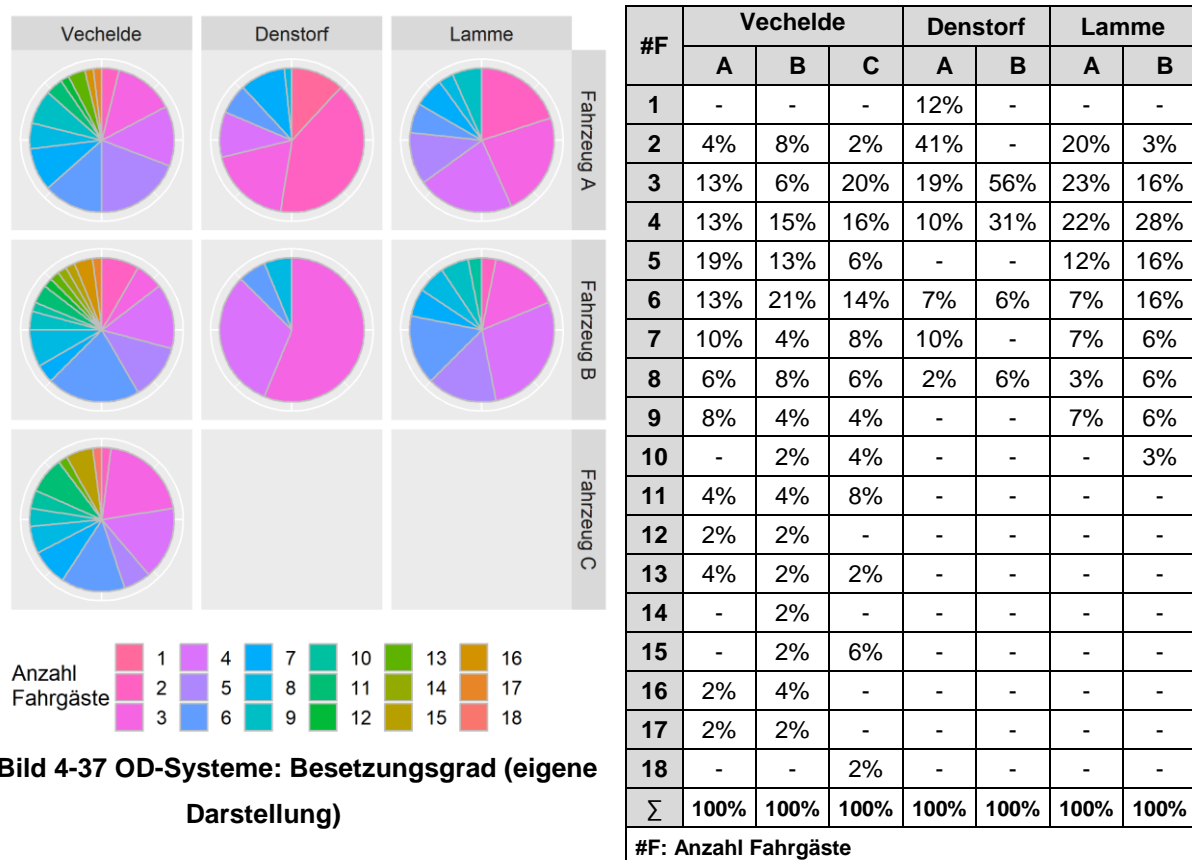
← Vechelde-Braunschweig	Haltestelle	Fahrzeit [min]	Entfernung [m]	↑ Braunschweig-Vechelde	Haltestelle	Fahrzeit [min]	Entfernung [m]
	Vechelde Bahnhof	-	-		Vechelde Bahnhof	3,9	1.600
	Mobilstation Vechelde	2,7	3.200		Mobilstation Vechelde	2,7	2.900
	Mobilstation Denstorf	2,3	2.900		Mobilstation Denstorf	3,1	2.700
	Mobilstation Lamme	2,8	2.700		Mobilstation Lamme	2,4	2.600
	Rosenaekern	2,6	2.600		Rosenaekern	-	-

Die Linienstrecke von Vechelde Bahnhof bis zur Haltestelle „Rosenackern“ hat eine Länge von 11,4 km bzw. 9,8 km in der anderen Richtung und verfügt über fünf Haltestellen. Die Entfernungen zwischen den Haltestellen, mit Ausnahme von der Mobilstation Vechelde zum Bahnhof, liegen bei über 2,5 km bzw. zwei Minuten.

Die BRT-Busse verbrauchen nach den Ergebnissen im Durchschnitt 9,2 kWh für die gesamte Fahrt (Hin- und Rückfahrt).

Die Verkehrssimulationen der OD-Zubringersysteme zeigen einen einwandfreien Betrieb. Alle Fahrgäste wurden rechtzeitig bedient und keine wesentlichen Verlustzeiten sind aufgetreten. Da diese Systeme nach Bedarf betrieben werden, sind ihre Leistungsmerkmale, wie z.B. die Anzahl der Fahrgäste und die Fahrzeiten, für jedes Serviceintervall sehr unterschiedlich. Die Tabelle 4-8 zeigt den relativen Anteil der Fahrten mit einer bestimmten Anzahl von Fahrgästen an einem Betriebstag. Das Bild 4-37 stellt diese Daten in Form eines Kreisdiagrammes dar.

Tabelle 4-8 OD-Systeme: Verteilung Besetzungsgrad



Wie zu erkennen ist, konnten die Anfragen effizient in allen drei Zubringersystemen gebündelt werden. Die drei Fahrzeuge des OD-Zubringersystems Vechelde wurden in weniger als 8% der Fahrten für nur zwei Anfragen eingesetzt. Des Weiteren haben die Fahrzeuge in 50% der Fahrten mehr als sechs Anfragen und in 20% der Fahrten mehr als 10 Anfragen bedient. Bei 50% der Fahrten des OD-Zubringersystems Lamme wurden mehr als fünf Passagiere

befördert. Der Anteil der Fahrten zur Bedienung von nur zwei Anfragen betrug 20% für das Fahrzeug A bzw. nur 3% für das Fahrzeug B. Das OD-Zubringersystem Denstorf zeigt aufgrund der geringen Nachfrage in diesem Betriebsgebiet Fahrten mit weniger Passagieren. Das Fahrzeug A diente in 56% der Fahrten nur einem oder zwei Anfragen. Das zweite Fahrzeug B wurde jedoch erst bei Fahrten mit drei oder mehr Passagieren eingesetzt.

Die durchschnittliche Anzahl der pro Fahrzeug beförderten Personen beträgt sieben, vier und fünf für das OD-Zubringersystem Vechelde, Denstorf bzw. Lamme. Diese Werte liegen deutlich über dem durchschnittlichen Besetzungsgrad des privaten Pkw von 1,5 in Deutschland (BMVI 2019).

Die Anzahl der Fahrgäste sowie die Fahrzeiten, die Kilometerleistung und der Batterieverbrauch pro Serviceintervall und Fahrzeug sind in Anhang 10 zu sehen. Die Tabelle 4-9 fasst die Fahrzeiten, die Kilometerleistung und den Batterieverbrauch für einen Betriebstag pro Zubringersystem und Fahrzeug als Summe zusammen.

Tabelle 4-9 OD-Systeme: Tägliche Fahrzeiten, Kilometerleistung und Batterieverbrauch

OD-System	Elektroauto	Fahrzeit [hh:mm]	Kilometerleistung [km]	Batterieverbrauch [kWh]
Vechelde	A	10:39	307,81	41,51
	B	10:42	287,82	37,50
	C	4:58	135,23	17,83
Denstorf	A	9:39	350,59	64,91
	B	1:54	60,22	10,07
Lamme	A	11:21	332,96	48,42
	B	5:13	148,05	21,71

Das System Vechelde hat wegen der hohen Nachfrage die höchsten Werte. Die Fahrzeuge A und B verkehren fast 11 Stunden der insgesamt 15 Betriebsstunden, was 72% der Zeit entspricht. Das dritte Fahrzeug hingegen ist nur fünf Stunden gefahren (33% der Zeit). In den anderen Systemen wurde das zweite Fahrzeug ebenfalls wesentlich weniger als das Fahrzeug A gebraucht.

Die zurückgelegte Fahrstrecke von allen Fahrzeugen liegt bei 730, 410 und 481 km für das System Vechelde, Denstorf und Lamme. Das System Lamme und Vechelde zeigen ein sehr ähnliches Verhältnis zwischen Fahrstrecke und Fahrzeit. Das System Denstorf hingegen, zeigt ein höheres Verhältnis zwischen diesen Werten. Dies erklärt sich durch den höheren Anteil an Schnellverbindungen im Betriebsgebiet Denstorf.

Der Energieverbrauch jedes Fahrzeuges zeigt ebenfalls starke Variationen mit Werten zwischen 10 und 65 kWh.

Zuletzt werden die Fahrzeiten von dem jeweiligen Zuhause bis zur Endhaltestelle „Rathaus“ analysiert. Es wurden zwei verschiedene intermodale Fahrten simuliert: die Fahrt vom

Zuhause bis zur Mobilstation mit dem Fahrrad und dann die Weiterfahrt mit der BRT-Linie (Bike+BRT) und die Kombination OD-Zubringersystem und BRT-Linie (OD+BRT).

Die mittlere Fahrzeit mit dem Fahrrad zur Mobilstation variiert zwischen drei und acht Minuten je Ort. Die Standardabweichung liegt in allen Fällen unter 1,5 Minuten. Die maximale Fahrstrecke liegt zwischen 1,7 und 3,3 km für Denstorf/Klein Gleidigen bzw. Vechelde. In der Tabelle 4-10 ist der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Fahrzeiten je Ort dargestellt.

Tabelle 4-10 Bike+BRT: Reisezeiten Tür-zu-Tür

Orte	Fahrzeit Fahrrad zur Mobilst. [min]		Fahrzeit zum Rathaus [min]		Reisezeit Tür-zu-Tür [min]	
	Ø	sd	Ø	sd	Ø	sd
Vechelde	3,9	1,4	24,7	0,2	28,6	1,4
Wahle	4,5	0,7			29,2	0,7
Vechelade	7,9	0,7			32,6	0,7
Wedtlenstedt	7,2	0,8	22,0	0,3	29,2	0,9
Denstorf/KG	3,1	1,1			25,2	1,1
Lamme	5,4	1,1	19,0	0,3	24,5	1,0

Ø= Mittelwert; sd= Standardabweichung

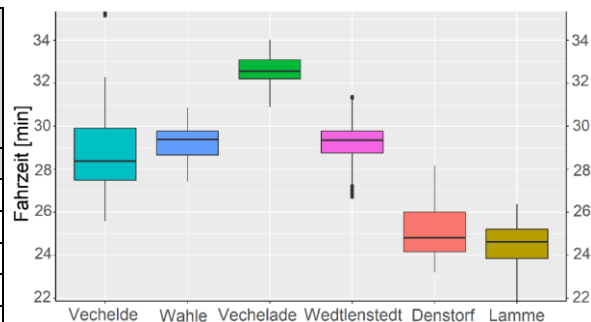


Bild 4-38 Bike+BRT: Reisezeit Tür-zu-Tür

Zuhause-Rathaus (eigene Darstellung)

In der Tabelle sind ebenfalls die Fahrzeiten mit der BRT-Linie von jeder Mobilstation bis zum Rathaus enthalten. Diese liegen bei 25, 22 und 19 Minuten von Vechelde, Denstorf bzw. Lamme. Die Standardabweichungen sind mit Werten von 0,3 Minuten unbedeutend.

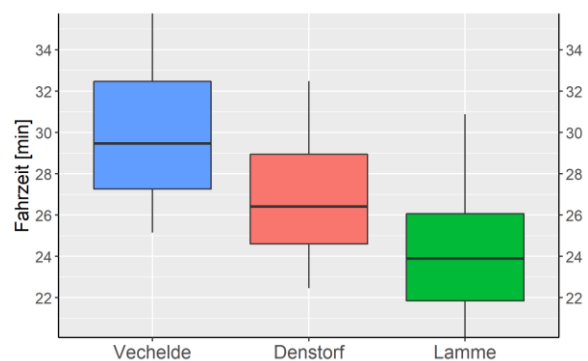
Die Reisezeiten von Tür zu Tür sind in der dritten Spalte der Tabelle zusammengeführt sowie in dem Bild 4-38 als Kastenplot dargestellt. Lamme zeigt mit 24,5 Minuten die minimale Reisezeit von Tür zu Tür. Wegen der größeren Entfernung zu der Mobilstation beträgt die maximale Reisezeit ca. 33 Minuten für Vechelade.

Die Fahrzeiten mit dem OD-Zubringersystem wurden global für jedes System berechnet. Da die Routen und damit die Reihenfolge der Orte abhängig von den Anfragen ist, ist eine Analyse je Ort nicht sinnvoll, sondern kann lediglich global für das ganze System betrachtet werden. Die Fahrzeit von dem jeweiligen Zuhause bis zur Mobilstation beträgt im Durchschnitt ca. fünf Minuten in allen OD-Systemen (siehe Tabelle 4-11). Die Werte zeigen aber relativ hohe Standardabweichungen, wobei 75% der Fahrten unter sieben Minuten Fahrzeit liegen.

Die zweite Spalte der Tabelle zeigt die Fahrzeit mit der BRT-Linie bis zum Rathaus und in der dritten Spalte sind die Reisezeiten von Tür zu Tür dargestellt. Diese betragen im Durchschnitt 30, 27 und 24 Minuten für Vechelde, Denstorf bzw. Lamme. Die Standardabweichung der Werte resultiert aus den Fahrzeiten mit dem OD-Zubringersystem. Auf dem Bild 4-39 sind die Reisezeiten von Tür zu Tür als Kastenplot dargestellt, wo die Abweichungen besser erkennbar sind.

Tabelle 4-11 OD+BRT: Reisezeiten Tür-zu-Tür

OD-System	Fahrzeit OD zur Mobilstation [min]		Fahrzeit zum Rathaus [min]		Fahrzeit Tür-zu-Tür [min]	
	Ø	sd	Ø	sd	Ø	sd
Vechelde	5,1	3,0	24,7	0,2	29,9	2,9
Denstorf	4,6	2,6	22,0	0,3	26,9	2,7
Lamme	5,1	2,6	19,0	0,3	24,2	2,6
Ø= Mittelwert; sd= Standardabweichung						

Bild 4-39 OD+BRT: Reisezeiten Tür-zu-Tür
Zuhause-Rathaus (eigene Darstellung)

Die Wartezeiten an der Mobilstation sind für die Attraktivität dieses Systems besonders wichtig. Nach den Ergebnissen der Verkehrssimulationen liegen die Wartezeiten im Durchschnitt bei ca. vier Minuten für die OD-Zubringersysteme Vechelde und Lamme und bei fünf Minuten für Denstorf. Diese Größenordnung ist für die Fahrgäste attraktiv, da es genug Zeit gibt von der Haltestelle des OD-Zubringers bis zur BRT-Haltestelle zu gehen und vielleicht noch einen Snack im Kiosk bzw. in der Bäckerei zu kaufen. Da für die anderen Verkehrsmittel die Wartezeiten nicht in den Reisezeiten von Tür zu Tür betrachtet wurden, wurden diese hier ebenfalls nicht berücksichtigt.

Um die Reisezeiten Tür-zu-Tür der vorgeschlagenen ÖPNV-Angebote mit dem privaten Individualverkehrsmittel zu vergleichen, wurden wiederum die Umwegfaktoren berechnet. Diese zeigen das Verhältnis zwischen beiden Reisezeiten. Die Berechnung der Fahrzeiten mit dem privaten Pkw wurde bereits im Abschnitt 4.3.2.1 durchgeführt. Die Tabelle 4-12 zeigt nun die Ergebnisse je Ort.

Tabelle 4-12 Reisezeiten mit dem Pkw und dem Trunk-and-Feeder-System

Orte	Reisezeit Pkw [min]	Reisezeit Bike+BRT [min]	Umwegfaktor [-]	Reisezeit OD+BRT [min]	Umwegfaktor [-]
Vechelde	23	29	1,24	30	1,30
Wahle	23	29	1,27	30	1,30
Vechelade	22	33	1,48	30	1,36
Wedtlenstedt	21	29	1,39	27	1,28
Denstorf	19	25	1,32	27	1,41
Lamme	19	24	1,29	24	1,27

Die intermodalen Fahrten Bike+BRT und OD+BRT zeigen ähnliche Reisezeiten mit Unterschieden von unter drei Minuten in allen Ortschaften. Für alle Orte bleibt der private Pkw das schnellste Verkehrsmittel. Die Umwegfaktoren liegen zwischen 1,2 und 1,5. Dies entspricht einem Unterschied von sechs bzw. 11 Minuten.

Die Simulationen zeigen gute Ergebnisse für den Betrieb jedes vorgeschlagenen ÖPNV-Angebots sowie dessen Schnittstellen. Die Analyse der Fahrzeiten mit der BRT-Linie zeigen geringe Zeitverluste aufgrund von Haltezeiten und Wartezeiten. Die simulierten Fahrgäste der OD-Zubringersysteme haben in allen Fällen den Anschluss an die BRT-Linie rechtszeitig und mit durchschnittlichen Wartezeiten von vier Minuten erreicht. Die Mobilstationen sind laut der Ergebnisse ebenfalls mit dem Fahrrad gut erreichbar (Fahrzeiten unter acht Minuten). Die Umwegfaktoren der Reisezeiten zwischen dem privaten Pkw und ÖPNV liegen bei unter 1,5. Die noch relativ hohen Umwegfaktoren und der hohe Anteil der sonstigen Zeitverluste der BRT-Linie zeigen jedoch noch ein verbleibendes Optimierungspotenzial des Linienvverlaufs in dem Innenstadtgebiet.

4.3.5 Vergleich der Szenarien

Die Ergebnisse der Verkehrssimulationen zeigen eine wesentliche Verbesserung des ÖPNV mit der Verwendung des Trunk-and-Feeder-Systems. Die Reisezeiten von Tür zu Tür wurden für alle Ortschaften verkürzt. Die Verminderung variiert zwischen 13% aus Vechelade mit der Kombination Bike+BRT und 38% aus Lamme mit der Kombination OD+BRT und Bike+BRT (siehe Tabelle 4-13).

Tabelle 4-13 Reisezeiten mit den bestehenden Buslinien und dem Trunk-and-Feeder-System

Orte	Reisezeit bestehende Buslinie [min]	Reisezeit Bike+BRT [min]	Verminderung der Reisezeit [%]	Reisezeit OD+BRT [min]	Verminderung der Reisezeit [%]
Vechelde	45	29	36%	30	33%
Wahle	-	29	-	30	-
Vechelade	38	33	13%	30	21%
Wedtlenstedt	34	29	15%	27	21%
Denstorf	31	25	19%	27	13%
Lamme	39	24	38%	24	38%

Der Ort Wahle verfügt zurzeit über kein direktes ÖPNV-Angebot nach Braunschweig, weshalb kein Prozentansatz in der Tabelle angegeben ist.

Das Bild 4-40 zeigt die durchschnittlichen Reisezeiten von Tür zu Tür mit den verschiedenen Verkehrsmitteln je Ortschaft. Der erste Balken zeigt die Reisezeit mit den bestehenden Buslinien. Der zweite und dritte Balken zeigt die Reisezeiten mit den vorgeschlagenen ÖPNV-Angeboten (Fahrrad oder OD-Zubringer plus BRT-Linie). Schließlich stellt die vierte Spalte die Reisezeiten mit dem motorisierten Individualverkehr dar.

Für die zwei am meisten besiedelten Ortschaften, Vechelde und Lamme, verkürzen sich die Reisezeiten mit den vorgeschlagenen ÖPNV-Angeboten erheblich. In allen Orten sind diese nun kompetitiver im Vergleich zu dem privaten Pkw.

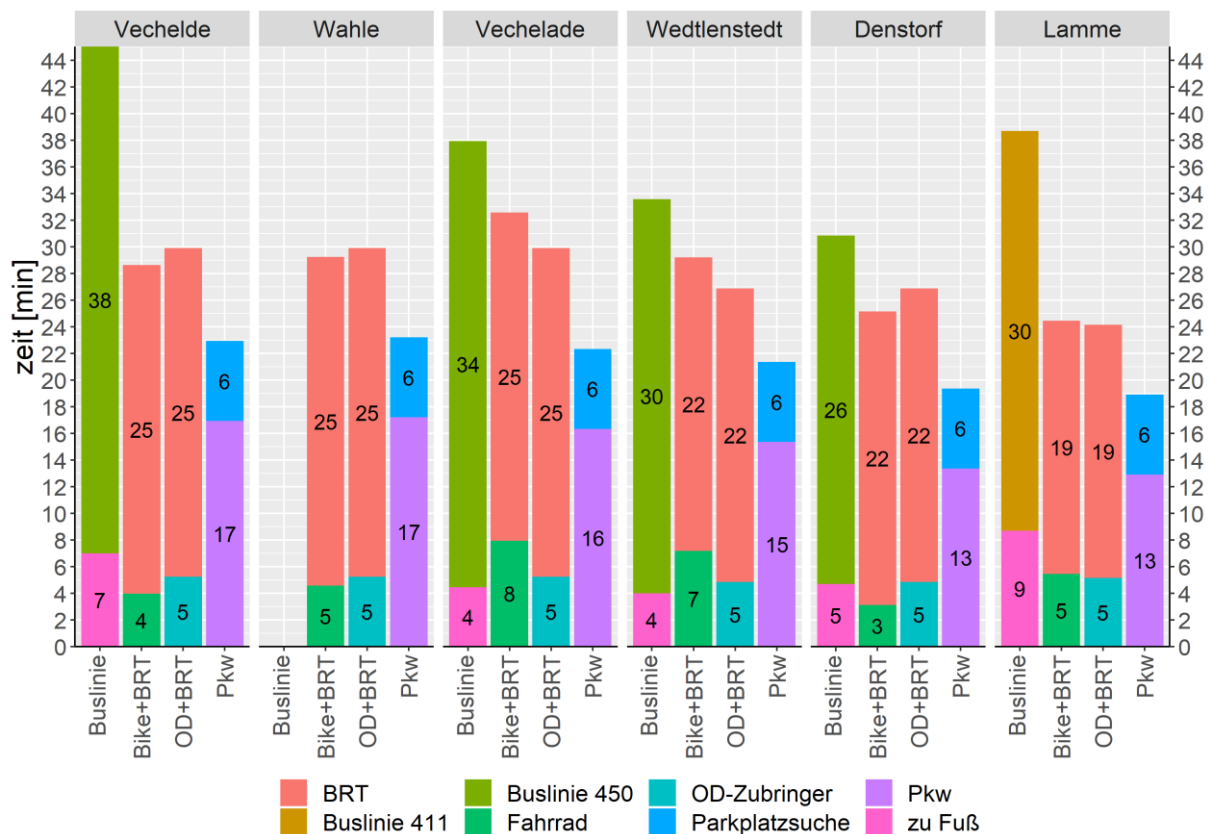


Bild 4-40 Reisezeiten Tür-zu-Tür mit allen betrachteten Verkehrsmitteln (eigene Darstellung)

Eine weitere Optimierung der BRT-Linie ist durch die Änderung des Linienvverlaufs in der Innenstadt möglich. Im Abschnitt 4.4 wird ein Konzept dafür vorgeschlagen.

4.3.6 Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführten mikroskopischen Verkehrssimulationen ermöglichten es, das Verbesserungspotenzial des geplanten Trunk-and-Feeder-Systems im Vergleich zum bestehenden ÖPNV quantitativ abzuschätzen.

Die Ergebnisse sind jedoch von verschiedenen Annahmen abhängig und können daher nicht eins-zu-eins in die Praxis übertragen werden. Die Datengrundlagen der Simulationsszenarien basieren auf einem bereits bestehenden Szenario, welches den Verkehr in der Stadt Braunschweig für einen durchschnittlichen Wochentag (Dienstag/Donnerstag) umfasst. Infolgedessen können diese Werte in der Realität, insbesondere an anderen Tagen und zu anderen Jahreszeiten, abweichen. Des Weiteren konnte die Validierung der Verkehrsbelastungen in den Simulationsszenarien aufgrund von fehlenden Daten nur anhand von täglichen aggregierten Verkehrsmengen durchgeführt werden. Nichtsdestotrotz liefern die Simulationsszenarien ein hilfreiches und realitätsnahes Modell zur Analyse der Einführung verschiedener Verkehrsmaßnahmen und/oder Verkehrssysteme in diesem Gebiet.

Die verschiedenen Anfrage-Profile an jedem OD-Zubringersystem wurden auf Basis der Einwohnerzahlen und verschiedener Annahmen im Modal-Split erzeugt. Die zehn Anfrage-

Profile und dementsprechend mehr als 600 simulierte Fahrten für jedes OD-Zubringersystem bilden eine gute Grundlage für eine Potenzialschätzung und Machbarkeitsanalyse.

Der selbst entwickelte Algorithmus stellt ein hilfreiches und wichtiges Werkzeug für die Analyse von OD-Zubringersystemen dar. Dank seines generellen Aufbaus ist seine Anwendung für andere OD-Zubringersysteme möglich. Der Algorithmus simuliert jedoch keine unerwarteten Ereignisse (z.B. Warten auf Fahrgast, Fahrgast als „No-Show“, langsames Ein-/Aussteigen und Buchung als Gruppe). Solche Fälle sind für die konkrete Aufnahme des Betriebs des OD-Zubringersystems noch zu berücksichtigen.

Darüber hinaus ist für weitere Schritte in Richtung der Implementierung des Systems eine zukünftige Modellierung der Nachfrage mit Daten zu den Quelle-Ziel-Matrizen empfehlenswert. Dies würde nicht nur zu einer genaueren Modellierung der Anfragen an das OD-Zubringersystem beitragen, sondern auch dazu, den Deckungsgrad des vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems abzuschätzen und den Linienverlauf des BRT-Systems in der Innenstadt zu planen.

4.4 Optimierungspotenzial des ÖPNV in der Innenstadt

In den Ergebnissen der Verkehrssimulationen wurde ein Verbesserungspotenzial im Linienverlauf in der Innenstadt Braunschweig festgestellt. Der Linienverlauf zwischen der Bushaltestelle „Rosenäckern“ und der Endhaltestelle „Rathaus“ hat eine Länge von 4,4 km mit 12 Bushaltestellen. Der Linienverlauf ist in Lila auf dem Bild 4-41 dargestellt.

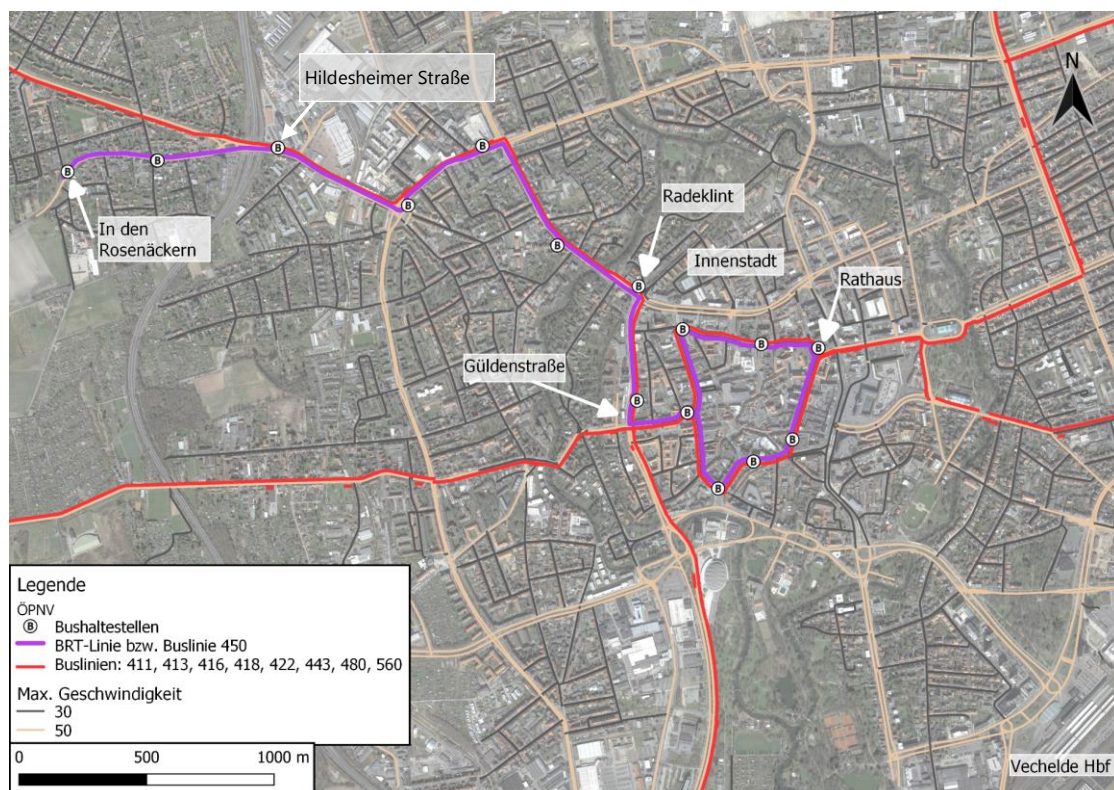


Bild 4-41 Linienverlauf in der Innenstadt (eigene Darstellung auf Basis von ©Google Maps)

Die Strecke zwischen der Haltestelle „Rosenäckern“ und „Radeklint“ verläuft direkt und über schnelle Straßen mit Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h (cremefarbig). Die Haltestellen sind mit Entfernungen von ca. 400-500 m auf dieser Strecke auch gut verteilt.

Das Problem liegt hauptsächlich bei der letzten Strecke zwischen der Haltestelle „Radeklint“ und „Rathaus“. Hier macht die Route einen Umweg durch die Altstadt, durch enge und kurvige Straßen mit maximaler Geschwindigkeit von 30 km/h (graue Straßen). Die Entfernungen zwischen den Haltestellen liegen für diese Strecke unter 300 m. Diese Route wird ebenfalls von acht weiteren Buslinien benutzt (rote Linien). Im Anhang 11 befindet sich der Liniennetzplan der Stadt Braunschweig sowie die Verkehrsbelastungen des ÖPNV für einen besseren Überblick.

Ein Optimierungskonzept ist z.B. die Umleitung der Buslinien durch schnelle und direkte Achsen außerhalb der Altstadt. Für die letzte Meile könnte ein Shuttle-Service mit Kleinbussen in dichter Taktung für die Ring-Route in der Altstadt eingesetzt werden. Dies würde nicht nur die ÖPNV-Angebote effizienter machen, sondern würde den Verkehr in der Altstadt entlasten. Die Verbindung zwischen den Buslinien und dem Shuttle-Service könnte über eine Mobilstation erfolgen, die auch eine Verbindung mit der Tramlinie 1 und 2 ermöglicht.

So könnte zum Beispiel die BRT-Linie ab der Haltestelle Radeklint weiter in Richtung Osten bis zur Kreuzung an der Bolweg Straße verlaufen. Südwestlich der Kreuzung befindet sich der Heinrichsbrunnen Platz, wo eine Mobilstation eingerichtet werden könnte (ca. 3.900 m²). Neben dem Platz liegt die Haltestelle „Hagenmarkt“ der Tramlinien 1, 2, 3 und 4. Die Linien 1 und 2 bilden den Haupt-Nord-Südkorridor der Stadt Braunschweig und binden den Hauptbahnhof, den Campus Nord der TU und mehrere Industriegebiete im Norden der Stadt an. Die Fahrt vom „Hagenmarkt“ zum Hauptbahnhof Braunschweig ist in neun Minuten möglich.

Da der Linienverlauf nun durch breite Hauptstraßen mit zwei oder drei Fahrspuren in jeder Richtung erfolgt, könnte die Einrichtung eines BRT-Korridors möglich sein. Der Korridor könnte in der Mitte der Fahrbahn zwischen der Haltestelle „Hildesheimer Straße“ (an der Kreuzung mit der Autobahn A391) und der Endstation „Hagenmarkt“ implementiert werden.

Der Shuttle-Service könnte die Mobilstation über die sekundäre Straße (Casparistraße) erreichen. Auf dem Bild 4-42 ist diese Variante des BRT-Linienvverlaufs (lila Linie) sowie des Shuttle-Services (gelbe Linie) und die Mobilstation dargestellt.

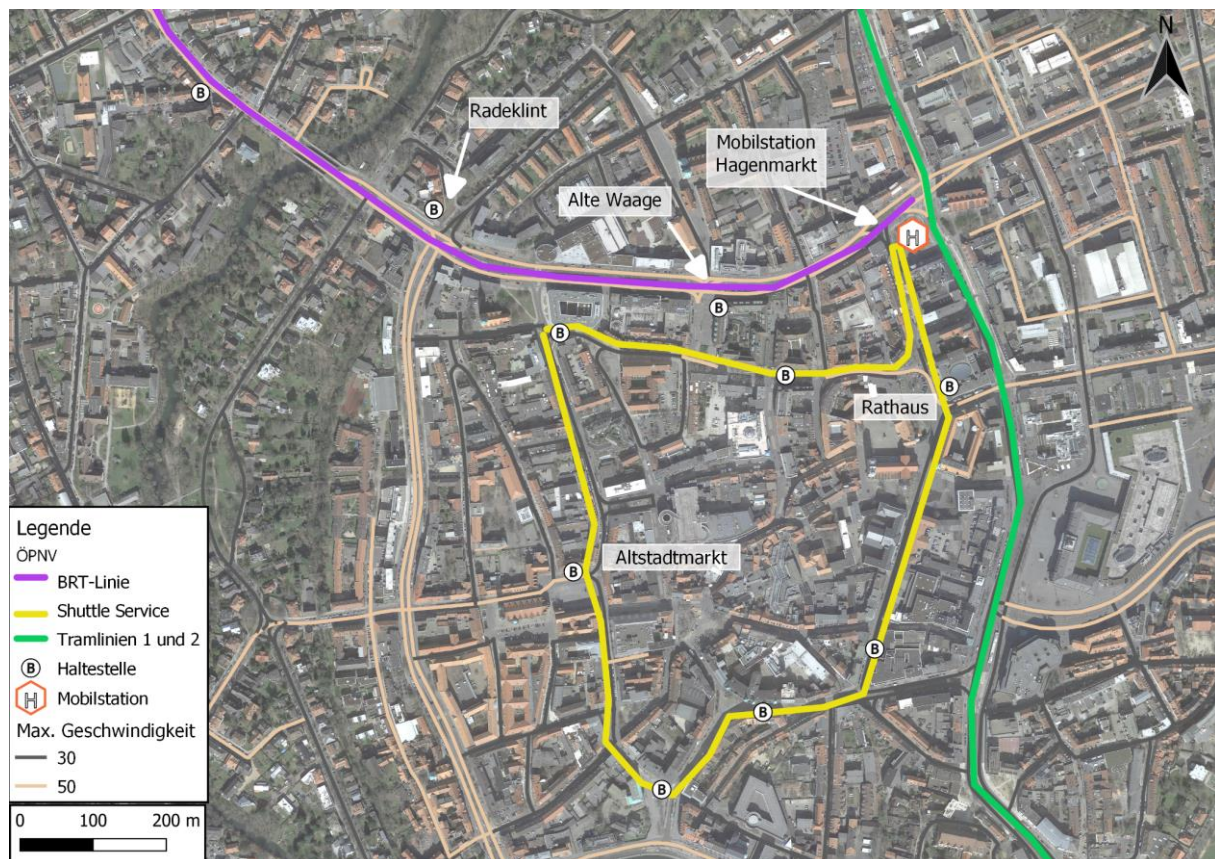


Bild 4-42 Konzept für die Optimierung des ÖPNV in der Innenstadt (eigene Darstellung auf Basis von ©Google Maps)

Für eine Schätzung der Fahrzeiten wurde eine Simulation von beiden Routen in SUMO durchgeführt. Die Umlaufzeit des Shuttle-Services ohne Betrachtung der Wendezeiten liegt bei ca. neun Minuten.

Die Fahrzeit der BRT-Linie von Vechede Bahnhof bis zur Mobilstation „Hagenmarkt“ beträgt 17 Minuten und 21 Minuten in der Gegenrichtung. Im Vergleich mit der Route durch die Altstadt bedeutet dies eine Verminderung von sechs Minuten. Dies würde zu ähnlichen Reisezeiten von Tür zu Tür wie mit dem privaten Fahrzeug führen und den durchschnittlichen Umwegfaktor auf 0,95 reduzieren. Die Tabelle 4-14 zeigt die Werte der Reisezeiten mit dem privaten Pkw und mit dem Fahrrad bzw. OD-Zubringer plus der BRT-Linie.

Tabelle 4-14 Reisezeiten mit der Optimierung des BRT-Systems in der Stadt

Orte	Reisezeit Pkw [min]	Reisezeit Bike+BRT [min]	Umweg- faktor [-]	Reisezeit OD+BRT [min]	Umweg- faktor [-]
Vechede	23	21	0,91	22	1,05
Wahle	23	21	0,91	22	1,05
Vechedade	22	25	1,14	22	0,88
Wedtlenstedt	21	21	1,00	19	0,90
Denstorf	19	17	0,89	19	1,12
Lamme	19	16	0,84	16	1,00

Der Energiebedarf einer Fahrt von Vechelde nach Braunschweig liegt bei 4,1 kWh und bei 4,9 kWh in der Gegenrichtung.

Im Anhang 12 ist ein 3D-Video für eine bessere Darstellung des Optimierungspotenzials von dem hier vorgeschlagenen Konzept sowie von der bestehenden Buslinie 450 zu finden.

Dieser Abschnitt zeigt erneut deutlich das noch vorhandene Optimierungspotenzial des ÖPNV in der Innenstadt. Da das ÖPNV-Angebot nicht nur schnell sein sollte, sondern auch eine gute Verbindung für die Fahrtwünsche der Kunden gewährleisten sollte, ist eine genauere Modellierung und Analyse der Nachfrage von größerer Bedeutung.

4.5 Betriebsprogramm und Kostenschätzung

Im Folgenden wird das Betriebsprogramm festgelegt und die Kostenschätzung für das vorgeschlagene Trunk-and-Feeder-System durchgeführt.

4.5.1 Betriebsprogramm der Bus-Rapid-Transit-Linie

Der Fahrplan der BRT-Linie wurde bereits im Abschnitt 4.2.2.1 festgelegt. Für das Betriebsprogramm muss noch die erforderliche Anzahl von Fahrzeugen bestimmt werden, welche sich aus dem Quotienten der Umlaufzeit und der Taktfrequenz ergibt.

Die Umlaufzeit umfasst die Zeit für die Hin- und Rückfahrt sowie die Wendezeiten an den Endhaltestellen. Es wurden als Referenz die Ergebnisse des Optimierungskonzeptes in der Innenstadt verwendet. Die Zeit für die Hin- und Rückfahrt beträgt 17 bzw. 21 Minuten, d.h. 38 Minuten hin und zurück (siehe Abschnitt 4.4).

Die Wendezeit an der Endhaltestelle in der Innenstadt wurde auf fünf Minuten festgelegt. Diese deckt eine Pufferzeit für den Ausgleich von Zeitverlusten ab. Die Wendezeit an der Endhaltestelle Vechelde Bahnhof beinhaltet auch die Synchronisationszeit für die Anpassung der Abfahrzeit an den Fahrplan und beträgt so 17 Minuten ($60 - 38 - 5$). Eine Wendezeit von zwei Minuten ($45 - 38 - 5$) wäre hier auch möglich jedoch nicht zu empfehlen, da kurze Wendezeiten zu Verspätungen führen könnten. Wendezeiten von über 10 Minuten zählen als Pausenzeiten für die Fahrer, sodass extra Pausen prinzipiell nicht notwendig wären (SCHNIEDER 2018). Infolgedessen beträgt die Umlaufzeit 60 Minuten ($17 + 5 + 21 + 17$).

Ein weiterer Punkt für die Planung des Betriebsprogramms von Elektrofahrzeugen ist die Ladung der Batterien. Laut der Simulationen haben die E-Gelenkbusse pro Fahrt einen Batteriebedarf von 9 kWh (siehe Abschnitt 4.4). Die Kapazität der Batterien variiert zwischen 90 und 150 kWh in Abhängigkeit der Batterieanzahl (siehe Abschnitt 4.2.2.2). Dies entspricht einer maximalen Reichweite von ca. zehn bzw. 16 Fahrten.

Die Ladung der Batterien wäre nach Angaben der Braunschweiger Verkehrs-GmbH zurzeit nur am Busdepot möglich, da die anderen zwei bereits gebauten Ladeplatten nicht auf dem BRT-Linienvverlauf liegen. Die Ladung am Busdepot erfordert aber hohe Leerfahrzeiten. Aus diesem Grund ist die Zwischenladung der Batterien durch induktive Ladesysteme bzw. Pantographen zu empfehlen. Diese Ladesysteme haben eine Ladeleistung von 200-500 kW mit einer kompletten Aufladung der Batterien in ca. 10-20 Minuten abhängig vom jeweiligen System (siehe BRAUNSCHWEIGER VERKEHRS-GMBH 2018; IRIZAR 2019). Der Einbau eines induktiven Ladesystems an der Endhaltestelle Vechelde Bahnhof würde die Ladung der Batterien während der Wendezeit ermöglichen, sodass keine Zusatzzeiten dafür erforderlich wären.

In der Tabelle 4-15 ist der Takt, die Umlaufzeit und die daraus resultierenden erforderlichen Fahrzeuganzahlen für jedes Zeitfenster zu sehen.

Tabelle 4-15 Betriebsplan BRT-Linie

Wochentag	Zeitfenster [Uhrzeit]	Taktung (1) [min]	Umlaufzeit (2) [min]	Fahrzeugeinsatz (2/1) [Anzahl]
Werktagen	06:00 - 21:00	15	60	4
	21:00 - 01:00	30	60	2
	01:00 - 06:00	60	60	1
Samstags	06:00 - 10:00	30	60	2
	10:00 - 21:00	15	60	4
	21:00 - 01:00	30	60	2
	01:00 - 06:00	60	60	1
Sonntags und Feiertagen	00:00 - 01:00	30	60	2
	01:00 - 00:00	60	60	1

Die maximale Fahrzeuganzahl liegt bei vier für die Zeitfenster mit einem 15 Minuten-Takt. Wird eine Fahrzeugreserve von einem Fahrzeug angenommen, dann ist für die BRT-Linie eine Fahrzeugflotte von fünf E-Gelenkbusse erforderlich.

4.5.2 Betriebsprogramm der On-Demand-Zubringersysteme

Die Anzahl der Fahrzeuge für die drei OD-Zubringersysteme wurde bereits in Abschnitt 4.3.3.2 festgestellt. Für das System Vechelde sind drei Elektroautos erforderlich, wobei für die OD-Zubringersysteme Denstorf und Lamme zwei Elektroautos vorgesehen sind. Für die drei Systeme wird eine Fahrzeugreserve von einem Fahrzeug angenommen, was einer gesamten Fahrzeugflotte von acht Fahrzeugen entspricht.

Die OD-Zubringersysteme wurden für den Betrieb mit Fahrern, also keine autonomen Fahrzeuge, geplant. Der Service wird von Montag bis Samstag zwischen 5:45 und 21:00 Uhr mit 15-Minuten Serviceintervallen angeboten (siehe Abschnitt 4.2.3.2).

Die Batterieleistung des angenommen Elektroautomodells ist nach dem Hersteller 31 kWh. Der Batteriebedarf wurde bereits im Abschnitt 4.3.4.1 für jedes Fahrzeug ermittelt und variiert zwischen 10 und 65 kWh. Infolgedessen ist in manchen Fällen die Ladung der Batterien während des Betriebs erforderlich. Dies kann entweder an jeder Mobilstation oder an einer Mobilstation mit der Funktion als Depot-Station erfolgen. Die erste Variante ermöglicht die Ladung der Batterien nach Bedarf während der Zeiten ohne Anfragen, aber erfordert den Einbau einer Ladesäule in jeder Mobilstation. Für die zweite Möglichkeit wäre der Einbau von nur einer bzw. zwei Ladesäulen an einem Ort erforderlich, wobei die Fahrzeuge dann während des Betriebs extra zu diesem Ort fahren müssten. Erhält das System in dieser Zeit mehr Anfragen als erwartet, dann werden nicht alle Fahrgäste bedient. Aus diesem Grund und in Betrachtung der zukünftig möglichen Verwendung von autonomen Fahrzeugen, ist die Einrichtung von Ladesäulen in jeder Mobilstation zu empfehlen.

Außerhalb der Betriebszeiten können die OD-Fahrzeuge an der Mobilstation abgestellt werden. Dazu sind Sicherheitsmaßnahmen gegen Vandalismus wie z.B. eine Kameraüberwachung erforderlich. Für die Wartung der Fahrzeuge ist jedoch eine Fahrt bis zum Depot notwendig.

4.5.3 Kostenschätzung

Die Kosten wurden auf Basis der Literatur festgesetzt und stellen deswegen nur eine grobe Schätzung dar. Es wurde zwischen Bau- und Betriebskosten unterschieden.

Die Baukosten der Mobilstationen wurden auf der Grundlage der im Abschnitt 4.2.1 dargestellten Entwürfe ermittelt. Die Kosten des Supermarkts sowie seiner Parkplätze in der Mobilstation Denstorf wurden nicht berücksichtigt. In der Tabelle 4-16 sind die Baukosten jeder Mobilstation dargestellt.

Tabelle 4-16 Baukosten der Mobilstationen

Kostenposition	Kosten/Einheit	Mobilstation Vechelde		Mobilstation Denstorf		Mobilstation Lamme	
		Menge	Kosten [€]	Menge	Kosten [€]	Menge	Kosten [€]
Fahrbahnfläche	160 €/m ² ⁽¹⁾	1.440 m ²	230.400	1.910 m ²	305.600	1.380 m ²	220.800
Gehbereich	120 €/m ² ⁽¹⁾	1.020 m ²	122.400	1.250 m ²	150.000	1.010 m ²	121.200
Fahrradweg	120 €/m ² ⁽¹⁾	130 m ²	15.600	420 m ²	50.400	-	-
Abstellbügel	160 €/St. ⁽²⁾	42 St.	6.720	43 St.	6.880	50 St.	8.000
Fahrradhaus	800 €/m ³ ⁽³⁾	168 m ³	134.400	168 m ³	134.400	168 m ³	134.400
Aufenthaltsraum	800 €/m ³ ⁽³⁾	90 m ³	72.000	90 m ³	72.000	90 m ³	72.000
Kiosk	800 €/m ³ ⁽³⁾	50 m ³	40.000	50 m ³	40.000	50 m ³	40.000
Bäckerei	800 €/m ³ ⁽³⁾	50 m ³	40.000	50 m ³	40.000	50 m ³	40.000
Wartehäuser	800 €/m ³ ⁽³⁾	25 m ³	20.000	25 m ³	20.000	25 m ³	20.000
Haltestelle Barrierefrei	12.000 €/St. ⁽⁴⁾	2 St.	24.000	2 St.	24.000	2 St.	24.000

Kostenposition	Kosten/Einheit	Mobilstation Vechelde		Mobilstation Denstorf		Mobilstation Lamme	
		Menge	Kosten [€]	Menge	Kosten [€]	Menge	Kosten [€]
Ladesäule (Zubringer)	15.250 €/St. ⁽⁵⁾	2 St.	30.500	1 St.	15.250	1 St.	15.250
		Summe	770.420	Summe	892.930	Summe	730.050
(1) Quelle: (LK ARGUS 2017; SÄCHSISCHE STAATSKANZLEI o. J.; STADT BAD-BERLEBURG 2017; VÖB 2008). (2) Quelle: (ADFC 2018; LANDESHAUPTSTADT POTSDAM 2014; RUPPRECHT-CONSULT o. J.) (3) Quelle: Eigene Annahme nach Empfehlung des Referenten Prof. Lühder (4) Quelle: (LAND NRW o. J.) (5) Quelle: (HACKER, VON WALDENFELS, und MOTTSCHELL 2015)							

Die ermittelten Baukosten der Mobilstationen liegen bei 770.420 Euro für Vechelde, 892.930 Euro für Denstorf und 730.050 Euro für die Mobilstation Lamme.

Dazu kommen die Investitionskosten für die Fahrzeuge der BRT-Linie und der OD-Zubringersysteme sowie die Ladeinfrastruktur. Die Investitionskosten für einen möglichen BRT-Korridor und eine Mobilstation in der Stadt werden hier nicht berücksichtigt, da diese nicht nur von der hier geplanten BRT-Linie, sondern auch von mehreren Buslinien der Stadt Braunschweig genutzt würden. In der Tabelle 4-17 sind die gesamten Investitionskosten dargestellt.

Tabelle 4-17 Investitionskosten

Kostenposition	Kosten/Einheit	Menge	Kosten [€]
Mobilstation Vechelde	770.420 €/St. ⁽⁰⁾	1 St.	770.420
Mobilstation Denstorf	892.930 €/St. ⁽⁰⁾	1 St.	892.930
Mobilstation Lamme	730.050 €/St. ⁽⁰⁾	1 St.	730.050
Induktive Ladestation (Pantographen)	600.000 €/St. ⁽¹⁾	1 St.	600.000
E-Gelenkbusse	650.000 €/St. ⁽²⁾	5 St.	3.250.000
Elektroauto	59.600 €/St. ⁽³⁾	8 St.	476.800
Anpassung LSA mit ÖPNV-Bevorrechtigung	60.000 €/St. ⁽⁴⁾	7 St.	420.000
		Summe	7.140.200
(0) Aus Tabelle 4-16 (1) Quelle: (HACKER, VON WALDENFELS, und MOTTSCHELL 2015) (2) Quelle: (KNOTE 2017) (3) Quelle: (LANG 2018; MERTENS 2018) (4) Quelle: (BAUTE 2019; RUOFF 2015)			

Die Investitionskosten betragen 7.140.200 Euro. Mit einem Anteil von 45% bilden die Elektro-Gelenkbusse die kostenintensivste Position.

Die Betriebskosten beinhalten die Kostenpositionen für den Betrieb und beziehen sich auf ein Jahr. Diese werden für das BRT-System und das OD-Zubringersystem in der Tabelle 4-18 dargestellt.

Tabelle 4-18 Jährliche Betriebskosten

Kostenposition	Kosten/Einheit	Menge	Kosten [€/Jahr]
BRT-System			
Energieverbrauch	45 €/MWh ⁽¹⁾	213 MWh/Jahr	9.582
Instandhaltung	0,45 €/km ⁽²⁾	709.800 km/Jahr	319.410
Personal (Selbstkosten mit Lohnnebenkosten)	30 €/Std. ⁽³⁾	23.660 Std. /Jahr	709.800
Abschreibung	46.042 €/Fz.-Jahr ⁽⁰⁾	4 Fz.	184.167
Fremdkapitalzinsen (5%)	18.688 €/Fz.-Jahr ⁽⁰⁾	4 Fz.	74.750
Kasko/Haftpflicht-Versicherung	7.000 €/Fz.-Jahr ⁽⁴⁾	4 Fz.	28.000
Sonstige Kosten	8.000 €/Fz.-Jahr ⁽⁴⁾	4 Fz.	32.000
Summe			1.357.709
OD-Zubringersystem			
Energieverbrauch	45 €/MWh ⁽¹⁾	75 MWh/Jahr	3.357
Instandhaltung	0,07 €/km ⁽²⁾	500.374 km/Jahr	35.026
Personal (Selbstkosten mit Lohnnebenkosten)	25 €/Std. ⁽³⁾	26.520 Std./Jahr	663.000
Abschreibung	8.443 €/Fz.-Jahr ⁽⁰⁾	7 Fz.	59.103
Fremdkapitalzinsen (5%)	1.714 €/Fz.-Jahr ⁽⁰⁾	7 Fz.	11.995
Kasko/Haftpflicht-Versicherung	2.000 €/Fz.-Jahr ⁽⁴⁾	7 Fz.	14.000
Sonstige Kosten	1.500 €/Fz.-Jahr ⁽⁴⁾	7 Fz.	10.500
Summe			796.981
<p>(0) Aus Tabelle A 13-3</p> <p>(1) Quelle: (EPEX SPOT 2019)</p> <p>(2) Quelle: (HACKER, VON WALDENFELS, und MOTTSCALL 2015)</p> <p>(3) Quelle: (KAIN 2019)</p> <p>(4) Quelle: (HACKER, VON WALDENFELS, und MOTTSCALL 2015; KAIN 2019)</p>			

Die jährlichen Betriebskosten der BRT-Linie liegen bei 1.357.709 Euro und die Kosten der OD-Zubringersysteme Vechelde, Denstorf und Lamme machen zusammen 796.981 Euro aus. Die Berechnungen der Betriebskosten je Fahrzeug befinden sich im Anhang 13.

Die Personalkosten sind in beiden Systemen die kostenintensivste Position. Für das BRT-System liegen diese bei 53% der gesamten Betriebskosten, während für die OD-Zubringersysteme diese bei 83% der gesamten Betriebskosten liegen. Diese Situation hat sich bereits in anderen Praxis- und Forschungsprojekten von On-Demand-Systemen gezeigt (HSL 2016; MÖRNER 2018; PAVONE 2015; SCHMIDT 2018). Der Einsatz von autonomen Fahrzeugen in naher Zukunft könnte eine Chance zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von OD-Zubringersystemen bieten.

Im Folgenden werden die Annahmen der Berechnung im Detail dargelegt. Die Kilometerleistung, Fahrzeiten sowie der Batterieverbrauch jedes Fahrzeuges des OD-Zubringersystems wurden bereits im Abschnitt 4.3.4.1 geschätzt. Diese Werte beziehen sich aber auf eine Schätzung der Nachfrage an Werktagen. Für den Betrieb am Samstag wurde auf der Grundlage der Mobilitätsquote aus dem Bericht „Mobilität in Deutschland (MiD)“ eine

Verminderung von 7% angenommen (vgl. Tabelle 1 BMVI 2017). Die Hochrechnung auf Jahresebene befindet sich in der Tabelle A 13-1 und Tabelle A 13-2 im Anhang 13.

Für die Ermittlung der Abschreibung pro Jahr wurde eine Nutzungsdauer von 12 Jahren für die E-Gelenkbusse und sechs Jahren für die Elektroautos angenommen. Der Fremdkapitalzins wurde mit 5% ermittelt. In der Tabelle A 13-3 im Anhang 13 ist die Berechnung dieser Kosten für den E-Gelenkbus und das Elektroauto zu sehen. Die Tabelle A 13-4 und Tabelle A 13-5 im genannten Anhang zeigen die Berechnung der gesamten Betriebskosten je Fahrzeug.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die steigende Anzahl von privaten Fahrzeugen hat zu einem starken Anstieg der Verkehrs- und Umweltbelastungen sowie zu einer Zunahme der Nutzung öffentlicher Flächen für Parkplätze geführt. Die Nutzung des privaten Fahrzeuges als Hauptverkehrsmittel konzentriert sich vor allem in ländlichen und peripheren Regionen. Die Gründe dafür sind hauptsächlich ineffiziente ÖPNV-Angebote, die durch indirekte und lange Linienverläufe, lange Warte- und Fahrzeiten, begrenzte Fahrpläne und niedrige Taktfrequenzen gekennzeichnet sind. Das Konzept von Trunk-and-Feeder kann hier attraktive ÖPNV-Angebote schaffen und zur Neukundengewinnung aus dem motorisierten Individualverkehr beitragen.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde anhand von Verkehrssimulationen ein Trunk-and-Feeder-System als Optimierung des bestehenden ÖPNV in einer ländlichen Region nahe Braunschweig untersucht. Das System sieht vor die bestehende Buslinie 450 durch ein Bus-Rapid-Transit (BRT) System für die stark nachgefragte Verbindung in die Stadt Braunschweig zu ersetzen. Das BRT-System wird durch ein On-Demand (OD) Zubringersystem ergänzt. Das Trunk-and-Feeder-System sieht auch die Ergänzung des BRT-Systems durch nichtmotorisierten Individualverkehr (NMIV) vor.

Die Simulationsergebnisse zeigen das große Potenzial und die Vorteile des vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems deutlich. Die Reisezeiten von Tür zu Tür reduzierten sich im Durchschnitt um 46% (17 Minuten). Der durchschnittliche Umwegfaktor liegt nun bei 0,95, sodass der ÖPNV im Vergleich zum privaten Fahrzeug an Attraktivität gewonnen hat. Die erhebliche Verkürzung der Umlaufzeiten von 81 auf 38 Minuten ermöglicht eine Taktfrequenz von 15 Minuten mit vier BRT-Bussen. Gemäß der Simulation besteht eine nahtlose Verbindung mit nur kurzen Wartezeiten zwischen jedem OD-Zubringersystem und der BRT-Linie.

Das Trunk-and-Feeder-System hat außerdem die Anbindung von zwei weiteren Orten mit 4.930 bzw. 1.437 Einwohnern an die BRT-Linie ermöglicht, wobei eine von diesen heutzutage über gar keine ÖPNV-Verbindung mit Braunschweig verfügt.

Der selbstentwickelte Algorithmus zur Simulation der OD-Zubringersysteme ermöglicht es eine Analyse der Leistung dieser Systeme mit verschiedenen Fuhrparkvarianten durchzuführen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Einsatz von zwei Fahrzeugen mit einer Kapazität von je sechs Passagieren die effizienteste Variante ist und eine bessere Bündelung der Anfragen ermöglicht. Die durchschnittliche Anzahl der pro Fahrzeug beförderten Personen beträgt sieben, vier und fünf für das OD-Zubringersystem Vechelde, Denstorf bzw. Lamme. Diese Werte liegen deutlich über dem durchschnittlichen Besetzungsgrad des privaten Pkw von 1,5 in Deutschland (BMVI 2019). Des Weiteren ist die Nutzung eines einzigen Fahrzeuges in keiner Weise empfehlenswert, da die Bündelung mehrerer Anfragen nicht möglichst ist, und

die Verwendung von Fahrzeugen mit hohen Kapazitäten ebenfalls nicht, da die Kapazität niemals komplett ausgenutzt werden kann.

Nach der Kostenschätzung betragen die Investitionskosten rund 7,1 Mio.€. Die jährlichen Betriebskosten der BRT-Linie belaufen sich auf rund 1,3 Mio.€ und die der drei OD-Zubringersysteme auf rund 0,7 Mio.€. Obwohl diese Kostenschätzung nur als Orientierungshilfe dienen kann, wurde das Problem der Kosteneffizienz von OD-Zubringersystemen gut dargestellt, da die Personalkosten 83% der gesamten Betriebskosten dieser Systeme ausmachen.

Die Wirtschaftlichkeit des hier vorgeschlagenen Trunk-and-Feeder-Systems könnte durch die Neukundengewinnung aufgrund kompetitiverer Reisezeiten, die gesteigerte Attraktivität und das größere Betriebsgebiet gegeben sein. Um dies genauer zu analysieren, ist in einem weiteren Schritt eine detailliertere Modellierung und Schätzung der Nachfrage an das System von großer Bedeutung. Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit des Systems sind auch andere Externalitäten wie die Reduzierung des Verkehrs in der Stadt und die Entwicklung einer umwelt- und menschenfreundlicheren Stadt zu betrachten.

Der zukünftig mögliche Einsatz von autonomen Fahrzeugen für den Betrieb der OD-Zubringersysteme birgt aufgrund von wegfallenden Personalkosten ein Potenzial für die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme.

Literaturverzeichnis

- ADAC 2018: Carsharing. München: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V (ADAC). https://www.adac.de/_mmm/pdf/fi_carsharing_sp_58306.pdf.
- ADFC 2018: Fahrradparkplätze - Platzbedarf, Einbau, Kosten. Berlin: Besuchsdatum: 13.06.2019. <https://adfc-berlin.de/radverkehr/fahrradalltag/fahrradparken/80-fahrradparkplaetze-platzbedarf-einbau-kosten.html>.
- AHREND, C., und M. HERGET 2012: Umwelt- und familienfreundliche Mobilität im ländlichen Raum. Berlin: Handbuch für nachhaltige Regionalentwicklung. https://www.ivp.tu-berlin.de/fileadmin/fg93/Forschung/Projekte/Laendlicher_Raum/ufm-handbuch.pdf.
- AIGNER-BREUSS, E, und E BRAUN 2011: Entwicklung der Mobilität älterer Menschen im ländlichen Raum-Projekt Motion 55+. Zeitschrift für Verkehrssicherheit.
- ALAZZAWI, S., M. HUMMEL, P. KORDT, U. A. 2018: Simulating the impact of shared, autonomous vehicles on urban mobility-a case study of Milan. SUMO User Conference. <https://www.eclipse.org/lists/sumo-user/pdf03JlLvTUZY.pdf>.
- ALONSO-MORA, J., S. SAMARANAYAKE, A. WALLAR, U. A. 2017: On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. Santa Barbara (USA): Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://www.pnas.org/content/114/3/462.abstract>.
- BABAR, Y., und G. BURTCH 2017: Examining the Impact of Ridehailing Services on Public Transit Use. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3042805.
- BARCELÓ, J. 2010: Fundamentals of Traffic Simulation. Barcelona: Springer.
- BAUTE 2019: Finanzierung der Investitionskosten für Anpassungen der Verkehrsinfrastruktur für Angebotsverbesserungen im Bus- und Straßenbahnverkehr in 2019. Bremen: Deputation für Umwelt, Bau, Verkehr, Stadtentwicklung, Energie und Landwirtschaft. https://www.bauumwelt.bremen.de/sixcms/media.php/13/S_TOP_14_19_564_De-puVorl_%D6PNV-Netzanpassungen_Investkosten.pdf.
- BBSR 2017: Laufende Raumbewachtung – Raumabgrenzungen: Städtischer und Ländlicher Raum. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Besuchsdatum: 11.04.2019.
- BCS 2019: Unterschiede free-floating & stationsbasiertes CarSharing. Bundesverband CarSharing e.V. (BCS). Abgerufen am 12.05.2019. <https://carsharing.de/presse/fo-tos/zahlen-daten/unterschiede-free-floating-stationsbasiertes-carsharing>.
- BESSEL, R. 2017: AIR-lebnisse Ballonteam: Lamme. Abgerufen am 11.03.2019. <https://www.air-lebnisse.de/luftbilder/luftbilder-von-braunschweig/luftbilder-braunschweig/lehndorf-watenbuettel/lamme/braunschweig-lamme-8-329>.

- BISCHOFF, J., M. MACIEJEWSKI, und K. NAGEL 2017: City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2017/17-11/BischoffMaciejewskiNagel2017SharedTaxiITSC.pdf>.
- BLENDER ONLINE COMMUNITY Version 7.9 Blender - a 3D modelling and rendering package. Blender Institute, Amsterdam: Blender Foundation. <http://www.blender.org>.
- BLONDIAU, T., B. VAN ZEEBROECK, und H. HAUBOLD 2016: 14 Economic Benefits of Increased Cycling. Transportation Research Procedia. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302538>.
- BLUE, E. 2014: Bikenomics: How bicycling can save the economy. Microcosm Publishing.
- BMEL 2016: Bericht der Bundesregierung zur Entwicklung der ländlichen Räume 2016. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- BMVBS, und BBR 2009: Mobilitätskonzepte zur Sicherung der Daseinsvorsorge in nachfrageschwachen Räumen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2009/DL_ON102009.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- BMVI 2016: Mobilitäts- und Angebotsstrategien in ländlichen Räumen: Planungsleitfaden für Handlungsmöglichkeiten von ÖPNV-Aufgabenträgern und Verkehrsunternehmen unter besonderer Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte flexibler Bedienungsformen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). <https://www.vdv.de/mobilitaets-und-angebotsstrategien-in-laendlichen-raeumen-low-bmvi.pdf>.
- BMVI 2017: Mobilität in Deutschland: Ergebnisbericht. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html>.
- BMVI 2018a: Langfristige Sicherung von Versorgung und Mobilität – ein Beitrag für gleichwertige Lebensverhältnisse in ländlichen räumen. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/versorgung-und-mobilitaet-in-laendlichen-raeumen.pdf?__blob=publicationFile.
- BMVI 2018b: Version V1.1 Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR) des BMVI für die Mobilitäts- und Verkehrsforschung (Arbeitspapier). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/regiostar-arbeitspapier.pdf?__blob=publicationFile.

- BMVI 2019: Mobilität in Deutschland: Kurzreport. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas_Mobilitaet_in_Deutschland_2017_Kurzreport_DS.pdf.
- BÖSCH, P., F. BECKER, H. BECKER, und K. AXHAUSEN 2018: Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy* (64). <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1201-1300/ab1225.pdf>.
- BOSSERHOFF, D. 2012: Ver_Bau: Abschätzung des Verkehrsaufkommens durch Vorhaben der Bauleitplanung mit Excel-Tabellen am PC. <https://www.dietmar-bosserhoff.de/Programm.html>.
- BRAUNSCHWEIGER VERKEHRS-GMBH 2018: Braunschweig fährt jetzt induktiv! Besuchsdatum: 11.03.2019. https://www.verkehr-bs.de/fileadmin/user_upload/downloads/Emil/A5_email_Flyer_WEB.pdf.
- BRAUNSCHWEIGER VERKEHRS-GMBH Fahrpläne und Liniennetzpläne. Besuchsdatum: 15.03.2019. <https://www.verkehr-bs.de/fahrplan/fahrplaene-und-netzplaene.html>.
- BROWN, A. 2018: Ridehail revolution: Ridehail travel and equity in Los Angeles.
- BUENOS AIRES Metrobus Buenos Aires. Abgerufen am 21.05.2019. <https://www.buenosaires.gob.ar/movilidad/metrobus>.
- CANZLER, W. 2008: Warum wir vom Auto abhängig sind. Neuere Ergebnisse aus der sozialwissenschaftlichen Mobilitätsforschung. München: TUM-Vortragsreihe Verkehr aktuell.
- CITY OF NEW YORK 2016: For-Hire Vehicle Transportation Study. Office of the Mayor. <https://www1.nyc.gov/assets/operations/downloads/pdf/For-Hire-Vehicle-Transportation-Study.pdf>.
- CLEWLOW, R., und G. MISHRA 2017: Disruptive transportation: The adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the United States. Davis (US): University of California, Institute of Transportation Studies. http://usa.streetsblog.org/wp-content/uploads/sites/5/2017/10/2017_UCD-ITS-RR-17-07.pdf.
- COOKSON, G., und B. PISHUE 2017: The Impact of Parking Pain in the US, UK and Germany. INRIX Research (21). http://sevic-emobility.com/images/news/INRIX_2017_Parking_Pain_Research_EN-web.pdf.
- CORDEAU, J., und G. LAPORTE 2007: The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research* (153). <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0170-8>.
- CZIOSKA, P., R. KUTADINATA, A. TRIFUNOVIĆ, U. A. 2017: Real-world Meeting Points for Shared Demand-Responsive Transportation Systems. https://www.researchgate.net/publication/320034163_Real-world_Meeting_Points_for_Shared_Demand-Responsive_Transportation_Systems.
- DENNIG, D., und N. SIEBER 2012: Alternative Bedienungsformen im ÖPNV: Typisierung und rechtlicher Rahmen. <http://www.niklas-sieber.de/Publications/Bedienungsformen.pdf>.

- DIE GRÜNEN WIEN 2019: Wien fördert Scooter-Abstellanlagen. Besuchsdatum: 01.06.2019.
<https://wien.gruene.at/verkehr/wien-foerdert-scooter-abstellanlagen>.
- DLKG 2009: Dörfer ohne Menschen!? - Zwischen Abriss, Umnutzung und Vitalisierung. Würzburg: Deutschen Landeskulturgesellschaft (DLKG). [https://www.landschaftt.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/ALL/EAF238E681C03EDCC125765E006F9107/\\$FILE/sonderheft2.pdf](https://www.landschaftt.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/ALL/EAF238E681C03EDCC125765E006F9107/$FILE/sonderheft2.pdf).
- DLR 2019: Reallabor Schorndorf geht zu Ende und zieht positive Bilanz. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Besuchsdatum: 14.03.2019.
https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10989/1769_read-31397/year-all/#/gallery/33351.
- EAÖ 2013: Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs - EAÖ 13. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- EAR 2005: Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs - EAR 05. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- ENOCH, M., S. ISON, R. LAWS, und L. ZHANG 2006: Evaluation study of demand responsive transport services in Wiltshire. Trowbridge, Wiltshire: Wiltshire County Council.
<http://www.wiltshire.gov.uk/demand-responsive-study-200607.pdf>.
- EPEX SPOT 2019: Marktdaten day-ahead-auktion. Besuchsdatum: 13.06.2019.
https://www.epexspot.com/de/marktdaten/dayaheadauktion/chart/auction-chart/2019-07-02/DE_LU.
- ERA 2016: Empfehlungen für Radverkehrsanlagen - ERA 10. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- ERDMANN, J., und D. KRAJZEWICZ 2015: Modelling Pedestrian Dynamics in SUMO.
https://www.researchgate.net/publication/276253183_Modelling_Pedestrian_Dynamics_in_SUMO/citation/download.
- ERDMANN, JAKOB 2014: 24 Lane-changing model in SUMO. <https://pdfs.semanticscholar.org/5f36/bc7be59fd4546a5f3b5de4cd91f43bf11825.pdf>.
- FEIGON, S., und C. MURPHY 2018: Broadening understanding of the interplay between public transit, shared mobility, and personal automobiles. National Academies Press.
<https://capitolhillvillage.org/wp-content/uploads/2018/11/Mobility-and-More.pdf>.
- FEIGON, S., C. MURPHY, und T. MCADAM 2018: Private Transit: Existing services and emerging directions. <https://www.nap.edu/catalog/25020/private-transit-existing-services-and-emerging-directions>.
- FEILBACH, J. 2018: Der Weg zur Arbeit: Verkehrsmittelnutzung in Berlin im Kontext soziostruktureller Merkmale. Berlin: Zeitschrift für amtliche Statistik Berlin Brandenburg.
https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/aufsaetze/2018/HZ_201802-04.pdf.

- GATHER, M., A. KAGERMEIER, und M. LANZENDORF 2009: Geographische Mobilitäts- und Verkehrsforschung. *Geographische Rundschau* (55).
- GEBHARDT, L., M. BROST, und T. STEINER 2019: Bus on demand – ein Mobilitätskonzept mit Zukunft. *GAIA*.
- GEMEINDE VECHELDE 2019a: Einwohnerzahlen Vechelde. Besuchsdatum: 16.04.2019. <https://www.vechelde.de/allgemeine-informationen/einwohnerzahlen>.
- GEMEINDE VECHELDE 2019b: Rechtskräftige Bebauungspläne. Besuchsdatum: 16.04.2019. <https://www.vechelde.de/wirtschaft-bauen-gewerbe/bebauungsplaene/rechtskraef-tige-bebauungsplaene>.
- GEWOS 2016: Wohnraumversorgungskonzept für den Landkreis Peine. Institut für Stadt-, Regional- und Wohnforschung GmbH (GEWOS). https://www.landkreis-peine.de/media/custom/2555_3584_1.PDF?1504185657.
- HACKER, F., R. VON WALDENFELS, und M. MOTTSCHALL 2015: Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen–Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung. Öko-Institut eV: Freiburg im Breisgau, Germany. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gesamtbericht-Wirtschaftlichkeit-von-Elektromobilitaet.pdf>.
- HÄLL, C., J. LUNDGREN, und P. VÄRBRAND 2008: Evaluation of an integrated public transport system: a simulation approach. *Archives of Transport* (20).
- HELMERT, C., und K. HENNINGER 2016: Mobilitätsbefragung: Untersuchung zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in der Stadt Duisburg. https://www2.duisburg.de/micro2/pbv/medien/bindata/Kurzbericht_Duisburg.pdf.
- HERES, D., D. JACK, und D. SALON 2014: Do public transport investments promote urban economic development? Evidence from bus rapid transit in Bogotá, Colombia. *Transportation Journal* (41).
- HINEBAUGH, D., und H. TANN 2009: Characteristics of bus rapid transit for decision-making. Federal Transit Administration. https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/CBRT_2009_Update.pdf.
- Hinweise zu Park+Ride (P+R) und Bike+Ride (B+R) 2018: FGSV 240 Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- HOOK, W., und L. WRIGHT 2007: Bus rapid transit planning guide. New York (US): Institute for Transportation and Development Policy. <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/Bus-Rapid-Transit-Guide-Complete-Guide.pdf>.
- HSL 2016: Kutsuplus-Final Report. Helsinki Regional Transport (HSL). https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/8_2016_kutsuplus_finalreport_english.pdf.
- IRIZAR 2019: Irizar E-Busse. Besuchsdatum: 01.06.2019. <https://www.irizar.com/en/autobuses-y-autocares/autobuses/irizar-i2e-18m/>.

- ITDP 2016: The BRT Standard. Institute for Transportation and Development Policy (ITDP).
<http://www.itdp-china.org/media/publications/pdfs/BRT2016-REV7.pdf>.
- ITDP 2017: BRT Planning Guide. Institute for Transportation and Development Policy (ITDP).
<https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/>.
- JAW 2016: Vechelde: Hildesheimer Straße. PAZ. Abgerufen am 11.03.2019. <https://www.paz-online.de/Kreis-Peine/Lengede-Vechelde-Wendeburg/Hildesheimer-Strasse-Umgestaltung-der-Kreuzung>.
- KAIN, J. 2019: Kostensteigerung im gewerblichen Personenverkehr mit Autobussen. Berufsgruppe Bus. <https://www.wko.at/branchen/transport-verkehr/autobus/kalkulationsbeispiele-gelegenheitsverkehr.pdf>.
- KELLER, M., S. HAUSBERGER, C. MATZER, U. A. 2017: HBEFA Version 3.3. Berne: Background documentation (12).
- KIRCHENGEMEINDE DENSTORF Gemeinde-Profil. Besuchsdatum: 25.06.2019. <http://www.denstorf.de/gemeinde-profil/>.
- KLEIN-HITPAß, A., und W. AICHINGER 2018: Umparken – den öffentlichen Raum gerechter verteilen. Berlin: Agora Verkehrswende. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/OEffentlicher_Raum_ist_mehr_wert/Agora-Verkehrswende_oeffentlicher-Raum_Factsheet_WEB.pdf.
- KNOTE, T. 2017: Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse. Fraunhofer. https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf.
- KOENIG, A, und K VIERGUTZ 2017: Der Fahrschein fuer den Anrufbus: Tarifgestaltung von bedarfsgesteuerten Bedienformen des oeffentlichen Verkehrs im laendlichen Raum. Nahverkehr (35). https://elib.dlr.de/111430/1/K%C3%B6nig_Viergutz_Bedarfsverkehr_Ticketing_Der_Nahverkehr_06_2017.pdf.
- KÖNIG, A., und J. GRIPPENKOVEN 2017: From public mobility on demand to autonomous public mobility on demand–Learning from dial-a-ride services in Germany. Bamberg, Germany: Logistik und Supply Chain Management; University of Bamberg Press.
- KOTUSEVSKI, G., und K. HAWICK 2009: 13 A Review of Traffic Simulation Software. https://www.researchgate.net/publication/228966705_A_Review_of_Traffic_Simulation_Software.
- KRAJZEWICZ, D. 2010: Traffic Simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility. hrsg. J. Barceló. New York, NY: Springer.
- KRAJZEWICZ, D., und J. ERDMANN 2013: Road Intersection Model in SUMO. https://elib.dlr.de/84363/1/Proceeding_SUMO2013-intersection.pdf.
- KRAJZEWICZ, D., N. FURIAN, und J. VERGÉS 2014: Großflächige Simulation von Verkehrsmanagementansätzen zur Reduktion von Schadstoffemissionen.

- KURCZVEIL, T., P. LÓPEZ, und E. SCHNIEDER 2013: Implementation of an Energy Model and a Charging Infrastructure in SUMO. Simulation of Urban MObility User Conference. Springer.
- KÜSTER, F., und B. BLONDEL 2013: Calculating the economic benefits of cycling in EU-27. European Cyclists' Federation.
- LAND NRW Barrierefreier Umbau von Bushaltestellen des NWL. Besuchsdatum: 13.06.2019. https://www.land.nrw/sites/default/files/asset/document/uebersicht_der_foerdermassnahmen.pdf.
- LANDESHAUPTSTADT KIEL Mobilitätsstationen für Kiel. https://www.kiel.de/de/umwelt_verkehr/verkehrswege/verkehrsentwicklung/_dokumente_mobilitaetsstationen/konzept_mobilitaetsstationen.pdf.
- LANDESHAUPTSTADT POTSDAM 2014: Fahrradabstellplätze bei Wohngebäuden. Besuchsdatum: 13.06.2019. https://www.mobil-potsdam.de/fileadmin/user_upload/bicycle/documents/Leitfaden_Fahrradabstellplaetze.pdf.
- LANG, P. 2018: Elektro-Taxi von LEVC im Fahrbericht. Auto motor und sport. Besuchsdatum: 13.06.2019. <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/london-taxi-levc-fahrbericht-2018/#preis>.
- LAVIERI, P., F. DIAS, N. JURI, U. A. 2018: A Model of Ridesourcing Demand Generation and Distribution. Transportation Research Record (46). https://www.researchgate.net/publication/324227779_A_Model_of_Ridesourcing_Demand_Generation_and_Distribution.
- LEHNHOFFA, N., und S. JANSSENA 2003: Abschätzung der Haltestellenaufenthaltszeiten im Nahverkehr. Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover.
- LEVINSON, H., S. ZIMMERMAN, J. CLINGER, und J. GAST 2003: Bus rapid transit: Synthesis of case studies. Transportation Research Record (1841). https://nacto.org/docs/usdg/brt_synthesis_of_case_studies_levinson.pdf.
- LI, Z., Y. HONG, und Z. ZHANG 2016: Do On-demand Ride-sharing Services Affect Traffic Congestion? Evidence from Uber Entry. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2838043.
- LITMAN, T. 2019: Autonomous vehicle implementation predictions. Canada: Victoria Transport Policy Institute Victoria. <https://www.vtpi.org/avip.pdf>.
- LK ARGUS 2017: Kostenschätzung erweiterter Erschließungsplan. Berlin: Besuchsdatum: 13.06.2019. https://www.berlin.de/ba-steglitz-zehlendorf/politik-und-verwaltung/aemter/stadtentwicklungsamt/stadtplanung-und-denkmalschutz/stadtplanung/bebauungsplanung/oeffentlichkeits-beteiligungen/2019/6-31ve_anlage_13_2_kostenschaetzung_erweiterter_erschliessungsplan.pdf.

- LOBECK, M. 2017: Digitale Zukunft auf dem Land: Wie ländliche Regionen durch die Digitalisierung profitieren können. Gütersloh: Bertelsmann Stiftung. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/170620_Endfassung_Digitale_Zukunft_korrigiert_2.pdf.
- LÖCKER, G., und B. FRIEDHELM 1994: Differenzierte Bedienungsweisen : Nahverkehrs-Bedienung zwischen großem Verkehrsaufkommen und geringer Nachfrage. Düsseldorf: Alba-Fachverl.
- LOKHANDWALA, M., und H. CAI 2018: Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18307551>.
- LOPEZ, P., M. BEHRISCH, L. BIEKER-WALZ, U. A. 2018: Microscopic Traffic Simulation using SUMO. 21th International Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE). <https://elib.dlr.de/124092/>.
- LU, W., L. QUADRIFOGLIO, und M. PETRELLI 2017: Reliability analysis of centralized versus decentralized zoning strategies for paratransit services.
- MAGEEAN, J., und J. NELSON 2003: The evaluation of demand responsive transport services in Europe. Journal of Transport Geography (11).
- Map data © Google Maps 2019: <https://www.google.de/maps>.
- Map data © OpenStreetMap contributors 2019: www.openstreetmap.org.
- MEHLERT, C. 2001: Die Einführung des AnrufBus im ÖPNV: Praxiserfahrungen und Handlungsempfehlungen. Schriftenreihe für Verkehr und Technik (91).
- MEHLERT, C., und A. KARL 2014: Vergabe und Genehmigung von Leistungen im Bedarfsverkehr: Was bei der Einrichtung differenzierter Bedienungsformen rechtlich und steuerlich zu beachten ist. Der Nahverkehr.
- MEHLERT, C., und M. SCHIEFELBUSCH 2017: Mobility on-demand: Disruption oder Hype?: Entwicklung und Zukunft von Rufbus, Sharing und Robotaxi. Der Nahverkehr.
- MELZER, K., und K. VIERGUTZ 2018: Ride-Sharing: Chancen und Regulierungskontext einer neuen Mobilitätsform.
- MERTENS, F. 2018: London Taxi kommt als Elektroversion nach Deutschland. Besuchsdatum: 13.06.2019. <https://www.autogazette.de/taxi/london/elektro/london-taxi-kommt-als-elektroversion-nach-deutschland-989387566.html>.
- METROPOLIS-SERVICE GMBH 2019: CarIE Intelligent Mobility. <http://carle24.com/>.
- METZ, T. 2017: Agent-Based Modeling (ABM). hrsg. S. Jäckle. Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-17189-6_2.
- MITCHELL, S., M. OSULLIVAN, und I. DUNNING 2011: PuLP : A Linear Programming Toolkit for Python.
- MOIA GMBH 2019: MOIA Ridesharing-Service. <https://www.moia.io/de-DE>.

- MÖRNER, M. 2018: Dissertation Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum. Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt. http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/7483/9/M%C3%B6rner_Sammelverkehr_mit_autonomen_Fahrzeugen_im_l%C3%A4ndlichen_Raum.pdf.
- NAGEL, K., J. BISCHOFF, G. LEICH, und M. MACIEJEWSKI 2018: Simulationsbasierte Analyse der Wirkungen von Flotten autonomer Fahrzeuge auf staedischen Verkehr. Zeitschrift fuer Verkehrswissenschaft (89). <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2018/18-06/NagelEtcFlottenAutonomerFahrzeuge-2018-05-16.pdf>.
- NWSIB-NI Online-Auskunft der Straßeninformationsbank Niedersachsen. Straßeninformationsbank Niedersachsen (NWSIB-NI). <https://www.nwsib-niedersachsen.de/application.jsp>.
- ORION GMBH 2019: Scooter-Parc. Besuchdatum: 01.03.2019. <https://www.orion-bausysteme.de/de/fahrradstaender/scooter-parc>.
- PAVONE, M. 2015: Autonomous mobility-on-demand systems for future urban mobility. Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45854-9_19.
- PENKE, S. 2012: Ländliche Räume und Strukturen – mehr als eine „Restkategorie“ mit Defiziten. hrsg. S. Debiel, A. Engel, I. Hermann-Stietz, u. a. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-18946-8_2.
- PERSCHL, M., und A. POSCH 2016: Carsharing – ein Mobilitätsansatz auch für den ländlichen Raum? hrsg. R. Egger und A. Posch. Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-10524-2_12.
- QGIS ENTWICKLUNGSTEAM Version 3.6.0. QGIS Geographisches Informationssystem. Open Source Geospatial Foundation Projekt. <https://qgis.org/es/site/>.
- RAST 2016: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen - RAST 06. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- RAYLE, L., D. DAI, N. CHAN, U. A. 2016: Just A Better Taxi? A Survey-Based Comparison of Taxis, Transit, and Ridesourcing Services in San Francisco.
- REGIONALVERBAND GROSßRAUM BRAUNSCHWEIG 2017: Klimaschutzteilkonzept Mobilität: Regionale e-Radschnellwege als Instrument zum Klimaschutz und zur CO2-Minderung im Alltagsverkehr. <https://www.regionalverband-braunschweig.de/rsw/>.
- REGIONALVERBAND GROSßRAUM BRAUNSCHWEIG 2019: Neubau eines Radweges von Wedtlenstedt nach Lamme. http://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/143010100000210674.html.
- RSTUDIO TEAM 2015: RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA: RStudio, Inc. <http://www.rstudio.com/>.

- RUOFF, P. 2015: Bevorrangungsmaßnahmen im urbanen ÖPNV. Diplomarbeit der Fachhochschule St. Pölten. http://umfrage.kurzwien.de/upload/DA_Bevorrangungsmassnahmen_final_low.pdf.
- RUPPRECHT-CONSULT Fahrradparkplätze und Abstellmöglichkeiten. Besuchsdatum: 13.06.2019. http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx_rupprecht/12_PRESTO_Infrastruktur_fahrradparkpltze_und_abestellmglichkeiten.pdf.
- SÄCHSISCHE STAATSKANZLEI Bewertung von Verkehrsflächen. Besuchsdatum: 13.06.2019. https://www.kommunale-verwaltung.sachsen.de/download/Kommunale_Verwaltung/Anlage_3_Verkehrsflaechen.pdf.
- SANDAG 2017: Mobility Hub Features Catalog. San Diego (US): San Diego Association of Governments (SANDAG). <https://www.sdforward.com/fwddoc/mobipdfs/mobilityhubcatalog-features.pdf>.
- SCHALLER, B. 2017: 1 Empty seats, full streets: Fixing manhattan's traffic problem. Schaller Consulting. <http://schallerconsult.com/rideservices/emptyseats.pdf>.
- SCHALLER, B. 2018: The New Automobility: Lyft, Uber and the Future of American Cities. <http://www.schallerconsult.com/rideservices/automobility.pdf>.
- SCHILCHER, C. 2015: Deutschland zwischen Wachstum und Schrumpfung: Wanderungsbewegung in Deutschland. Bertelsmann Stiftung. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/user_upload/Deutschland_zwischen_Wachstum_und_Schrumpfung.pdf.
- SCHMIDT, C. 2018: Analyse und Bewertung von Demand Responsive Transportation (DRT) und traditionellem Buslinienangebot: Eine Multi-Agenten Fallstudie über die ländlich geprägte sächsische Kleinstadt Colditz. Masterarbeit an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. <https://elib.dlr.de/121144/>.
- SCHNIEDER, L. 2018: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr (2. Auflage). Springer.
- SCHNIEDER, L., und K. LEMMER 2012: Anwendungsplattform Intelligente Mobilität - eine Plattform für die verkehrswissenschaftliche Forschung und die Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. https://www.researchgate.net/publication/259898448_Anwendungsplattform_Intelligente_Mobilitat_-_eine_Plattform_fur_die_verkehrswissenschaftliche_Forschung_und_die_Entwicklung_intelligenter_Mobilitatsdienste.
- SCHÖFL, G., M. SCHÖFL, und S. SPEIDEL 2009: 71 Kommunales Flächenmanagement im Ländlichen Raum: die Aktivierung ungenutzter Gebäude und Bauflächen am Beispiel MELAP. Flächenmanagement und Bodenordnung (71).

- SCHWEIG, K., S. KEUCHEL, R. KLEINE-WISKOTT, U. A. 2004: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden. Bundesanstalt für Straßenwesen (bast). <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/187/file/V113.pdf>.
- SCHWIETERMAN, J., und C. SMITH 2018: Sharing the ride: A paired-trip analysis of UberPool and Chicago Transit Authority services in Chicago, Illinois. *Journal of the Transportation Research Forum* (57). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885918302683>.
- STADT BAD-BERLEBURG 2017: Straßenausbau / Kanal- und Wasserleitungsbau „Moltkestraße“. Besuchsdatum: 13.06.2019. https://www.bad-berleburg.de/media/custom/1746_7203_1.PDF?1513089882.
- STADT BRAUNSCHWEIG 2017a: Einwohnerzahlen nach Stadtbezirken. Besuchsdatum: 03.03.2019. https://www.braunschweig.de/politik_verwaltung/statistik/ez_stadtbezirke.html.
- STADT BRAUNSCHWEIG 2017b: ÖPNV in einer wachsenden Großstadt: Stadtbahnausbaukonzept für Braunschweig. Besuchsdatum: 15.03.2019. <https://www.stadt-bahn-plus.de/>.
- STADT BRAUNSCHWEIG 2019: Neues Wohnbauland in Braunschweig. Besuchsdatum: 01.03.2019. http://www.braunschweig.de/leben/stadtplanung_bauen/wohnbaugebiete/index.html.
- STADT BRAUNSCHWEIG Verkehrsmengenkarte für Braunschweig. Besuchsdatum: 11.03.2019. https://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengenkarten.html.
- STADT MÜNSTER 2013: Verkehrsverhalten und Verkehrsmittelwahl der Münsteraner: Ergebnisse einer Haushaltsbefragung im Herbst 2013 Beiträge. Besuchsdatum: 06.04.2019. https://www.stadt-muenster.de/sessionnet/sessionnetbi/vo0050.php?__kvonr=2004037493.
- STADT SCHORNDORF 2019: Reallabor Schorndorf. Besuchsdatum: 04.03.2019. <https://www.reallabor-schorndorf.de/>.
- STADTRAUM GMBH 2017: Analyse von Haltestellenaufenthalten. Stadtraum - Gesellschaft für Raumplanung, Städtebau & Verkehrstechnik mbH. http://www.stadtraum.com/stadtraum/DASYS_HALT.pdf.
- STEINRÜCK, B., und P. KÜPPER 2010: Mobilität in ländlichen Räumen unter besonderer Berücksichtigung bedarfsgesteuerter Bedienformen des ÖPNV. *Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie*.
- STIGLIC, M., N. AGATZ, M. SAVELSBERGH, und M. GRADISAR 2015: The benefits of meeting points in ride-sharing systems. *Transportation Research Part B: Methodological* (82). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515002088>.

- STIMULATE 2019: STIMULATE: Stadtverträgliche Mobilität unter Nutzung elektrischer automatisierter Kleinbusse. Abgerufen am 24.06.2019. <https://www.wir-fahren-zukunft.de/>.
- SUMO ENTWICKLUNGSTEAM Version 1.2.0 Eclipse SUMO - Simulation of Urban MObility. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). <https://sumo.dlr.de/wiki>.
- TEWEBs 2014: Vechelade, Paul-Behmann-Straße. Abgerufen am 11.03.2019. <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Vechelade.JPG>.
- TREIBER, M., und A. KESTING 2010: Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Heidelberg: Springer.
- UN DESA Anteil der in Städten lebenden Bevölkerung in Deutschland und weltweit von 1950 bis 2010 und Prognose bis 2030. Statista. Zugriff am 7. Juni 2019. <https://ezproxy.fh-muenster.de:2120/statistik/daten/studie/152879/umfrage/in-staedten-lebende-bevoelkerung-in-deutschland-und-weltweit/>.
- VAN HOOL 2019: BRT-Fahrzeuge von Van Hool (ExquiCity). <https://www.van-hool.be/de/opnv/exquicity-brt>.
- VCD Die Digitalisierung der Mobilität. Verkehrsclub Deutschland e.V.. Besuchsdatum: 01.06.2019. <https://www.vcd.org/themen/multimodalitaet/schwerpunktthemen/digitalisierung-mobilitaet/>.
- VDI 2018: VDI-Richtlinie 3633: Simulation of systems in materials handling, logistics and production - Terms and definitions. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI).
- VETTER, T., und K. HAASE 2008: Alternative Bedienformen im ÖPNV: Akzeptanzstudie im Landkreis Saalkreis. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr. https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivw/ressourcen/dateien/diskuss/diskbeitrag_2008_1.pdf?lang=de.
- VIERGUTZ, K., und F. BRINKMANN 2018: Anforderungen von Nutzern flexibler öffentlicher Mobilitätskonzepte an digitale Fahrgastinformationen mit Echtzeitdaten. hrsg. H. Proff und M. Fojcik. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://elib.dlr.de/118411/1/Viergutz_Brinkmann_2018_DFI_DRT.pdf.
- VINCENT, W., und L. JERRAM 2006: The potential for bus rapid transit to reduce transportation-related CO₂ emissions. Journal of Public Transportation (9).
- VÖB 2008: Bewertung von Verkehrsflächen. Bundesverband Öffentlicher Banken Deutschlands (VÖB). Besuchsdatum: 13.06.2019. <https://www.voeb.de/download/by08>.
- VORTISH, P., und V. WABMUTH 2007: VALIDATE: A Nationwide Dynamic Travel Demand Model for Germany. Daytona, Florida: Transportation Research Board Planning Applications Conference.
- WESTFALEN BAHN Fahrpläne und Liniennetzpläne. <https://www.westfalenbahn.de/fahrplaene/linienfahrplaene/>.

- WINKEL, R. 2008: Öffentliche Infrastrukturversorgung im Planungsparadigmenwandel. Informationen zur Raumentwicklung. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/IzR/2008/1_2/Inhalt/DL_winkel.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- WOCHNIK, M., M. VON SCHLICHTKRULL-GUSE, R. HOPPE, U. A. 2015: Mobilität – eine Herausforderung in ländlichen Räumen: Wie Jugendsozialarbeit berufliche Teilhabechancen junger Menschen unterstützen kann. http://www.jugendsozialarbeit.de/media/raw/KVJS_Beitraege5_web.pdf.
- ZIMMERMAN, S., J. CLINGER, S. RUTHERFORD, U. A. 2003: Tcrp report 90: Bus rapid transit, volume 1: Case studies in bus rapid transit. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies.
- ZUKUNFTSNETZ MOBILITÄT NRW 2015: Handbuch Mobilstationen Nordrhein-Westfalen. Zukunftsnetz Mobilität NRW. https://www.zukunftsnetz-mobilitaet.nrw.de/sites/default/files/downloads/2015-10-14_handbuch_mobilstationen_nrw_download_neu.pdf.

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	<i>DARP-Algorithmus</i>	<i>A.2</i>
Anhang 2	<i>Fahrzeugparameter.....</i>	<i>A.3</i>
Anhang 3	<i>Verkehrsmengenkarte der Stadt Braunschweig</i>	<i>A.4</i>
Anhang 4	<i>Simulationsszenario 0 (Buslinie 450).....</i>	<i>A.5</i>
Anhang 5	<i>Berechnung der Wege pro Tag nach Bosserhoff.....</i>	<i>A.6</i>
Anhang 6	<i>Ganglinien der Nachfrage der OD-Zubringersysteme</i>	<i>A.9</i>
Anhang 7	<i>Anfrage-Profile für die Simulation der OD-Zubringersysteme.....</i>	<i>A.10</i>
Anhang 8	<i>Simulation der Fuhrparkvarianten der OD-Zubringersysteme.....</i>	<i>A.13</i>
Anhang 9	<i>Simulationsszenario 1 (Trunk-and-Feeder-System)</i>	<i>A.14</i>
Anhang 10	<i>Simulationsergebnisse der OD-Zubringersysteme</i>	<i>A.15</i>
Anhang 11	<i>Liniennetzplan und ÖPNV-Personenfahrten in Braunschweig.</i>	<i>A.18</i>
Anhang 12	<i>3D-Videos</i>	<i>A.20</i>
Anhang 13	<i>Ermittlung der Betriebskosten</i>	<i>A.21</i>

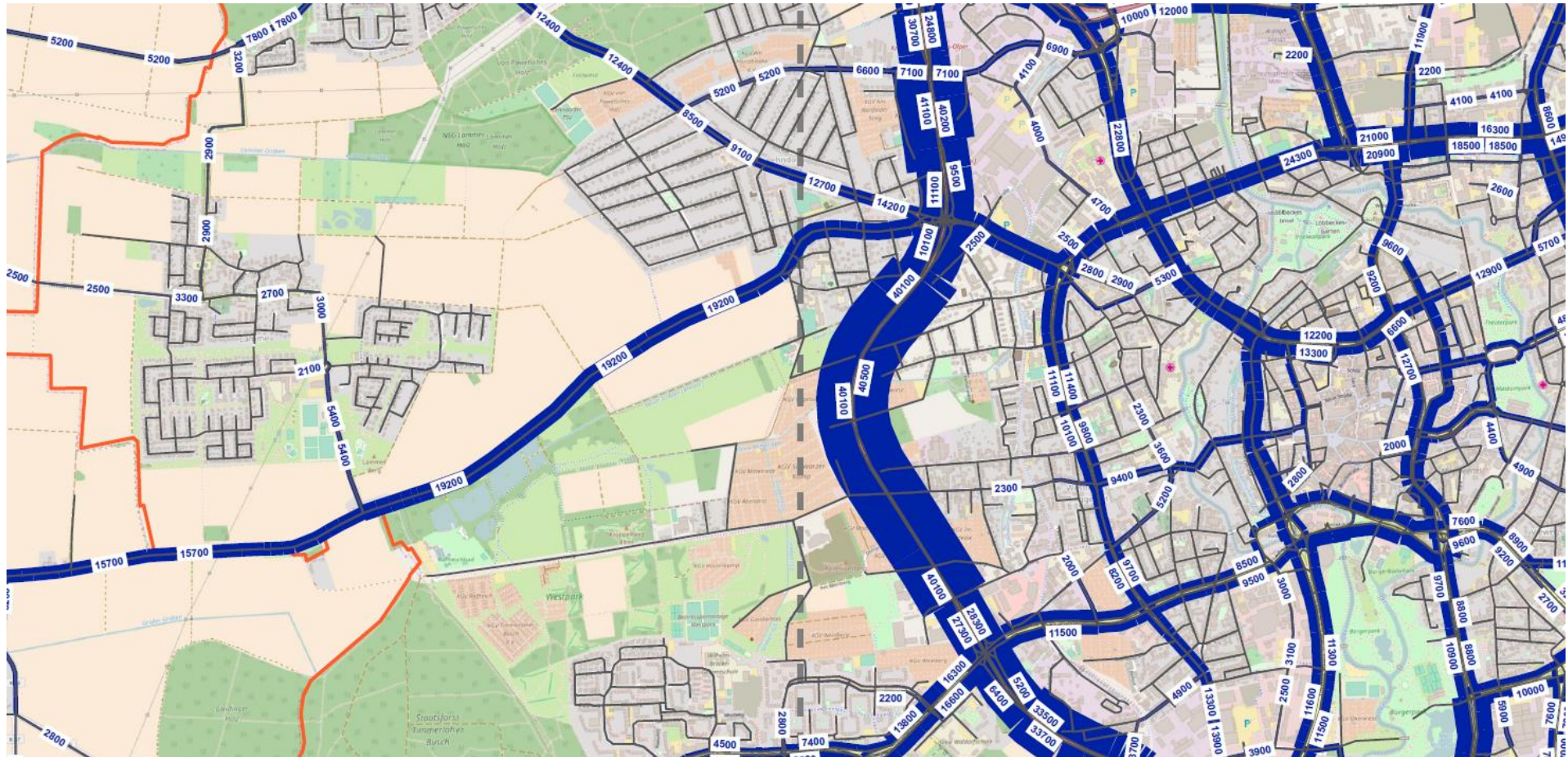
Anhang 1 DARP-Algorithmus

Die Dateien sind auf der beigelegten CD gespeichert.

Tabelle A 2-1 Verwendete Fahrzeugparameter in den Simulationen

Fahrzeug	SUMO	Lange Breite Höhe [m]	Abst. [m]	a _{max} [m/s ²]	b [m/s ²]	be [m/s ²]	v _{max} [km/h]	Kap.	Euro-K
Fußgänger	pedestrian	0,21 0,47 1,71	0,25	1,5	2	5	5,4	-	Null
Rad	bicycle	1,60 0,65 1,70	0,5	1,2	3	7	20	1	Null
Pkw	passenger	4,30 1,80 1,50	2,5	2,9	7,5	9	180	5	Diesel Euro 4
Elektroauto	passenger	4,30 1,80 1,50	2,5	2,9	7,5	9	180	6	Null
Elektro-Kleinbus	passenger/ van	4,70 1,90 1,73	2,5	2,9	7,5	9	180	12	Null
Bus 450	bus	12,00 2,50 3,40	2,5	1,2	4	7	85	85	Bus
E-Gelenkbus	bus/ flexible	17,90 2,50 3,00	2,5	1,2	4	7	100	155	Null

SUMO: vClass
Abst.: min. Abstand
a_{max}: max. Beschleunigung
b: Verzögerung
be: Notfallverzögerung
v_{max}: Höchstgeschwindigkeit
Kap.: Kapazität
Euro-K: Emissionsklasse (Modelliert nach HBEFA Version 3.3 (KELLER U. A. 2017))

Anhang 3 Verkehrsmengenkarte der Stadt Braunschweig**Bild A 3-1 Verkehrsmenge im Werktagsverkehr in [Kfz/24h] (Ausschnitt aus STADT BRAUNSCHWEIG o. J.)**

Anhang 4 Simulationsszenario 0 (Buslinie 450)

Die Dateien sind auf der beigelegten CD gespeichert.

Anhang 5 Berechnung der Wege pro Tag nach Bosserhoff

Programm **Ver_Bau**

Verkehrsaufkommen durch Vorhaben der **Bau** leitplanung (FGSV)

© Dr. Bosserhoff

3.2 Wohngebiete (WS, WR, WA, WB): Abschätzung des Verkehrsaufkommens

Hinweis: Nachfolgend wird die im Arbeitsblatt "Strukturgrößen" in der Tabelle am Schluss im fett umrahmten Teil gewählte Einwohnerzahl verwendet.

Wohnnutzung: Einwohnerverkehr

Gebiet	Nutzung	Einwohner		Wege/ Einwohner/d		Wege/Werktag insgesamt		Anteil der Einw.wege außerhalb des Gebiets	Wege/Werktag gebietsbezogen		MIV-Anteil Einwohner	
				Wege/EW/d							in %	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max		in %	Min	Max	Min
Vechelde		6,108		3.0		18,324		15	15,575			
Wahle		1,437		3.0		4,311		15	3,664			
Vechelade		552		3.0		1,656		15	1,408			
								0				
								0				
Summe		8,097				24,291			20,647			

Pkw-Fahrten/d Einwohner	
Pers./Pkw	
Min	Max

Wohnnutzung: Besucherverkehr

Gebiet	Nutzung	Anteil des Besucher- verkehrs in %	Wege/Werktag Besucher		MIV-Anteil Besucher	
			Min	Max	Min	Max
Vechelde		5	916			
Wahle		5	216			
Vechelad		5	83			
		0				
		0				
Summe			1,215			

Pkw-Fahrten/d Besucher	
Pers./Pkw	
Min	Max

Programm **Ver_Bau**

Verkehrsaufkommen durch Vorhaben der **Bau** leitplanung (FGSV)

© Dr. Bosserhoff

Wohngebiete (WS, WR, WA, WB): Gesamtverkehr

Tagesbelastungen im Gesamtverkehr (ohne Wirtschaftsverkehr): Gebietsbezogener Verkehr [Wege/Fahrten mit allen Verkehrsmitteln]
Quell-/Zielverkehr und Binnenverkehr (d.h. Fahrten mit Quelle und/oder Ziel im Plangebiet)

Gebiet	Nutzung	Wohnnutzung				Gewerbliche Nutzung				Gesamtverkehr	
		Einwohner-Verkehr Wege/Fahrten		Besucher-Verkehr Wege/Fahrten		Beschäftigten-V. Wege/Fahrten		Kunden-Verkehr Wege/Fahrten		Wege/Fahrten	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Vechelde		15,575	15,575	916	916					16,492	16,492
Wahle		3,664	3,664	216	216					3,880	3,880
Vechelad		1,408	1,408	83	83					1,490	1,490
Summe		20,647	20,647	1,215	1,215					21,862	21,862

Bild A 5-1 Ergebnisse des Programms „Ver_Bau“ für das OD-Zubringersystem Vechelde (aus BOSSERHOFF 2012)

3.2 Wohngebiete (WS, WR, WA, WB): Abschätzung des Verkehrsaufkommens

Hinweis: Nachfolgend wird die im Arbeitsblatt "Strukturgrößen" in der Tabelle am Schluss im fett umrahmten Teil gewählte Einwohnerzahl verwendet.

Wohnnutzung: Einwohnerverkehr

Gebiet	Nutzung	Einwohner		Wege/ Einwohner/d		Wege/Werktag insgesamt		Anteil der Einw.wege außerhalb des Gebiets	Wege/Werktag gebietsbezogen		MIV-Anteil Einwohner	
				Wege/EW/d							in %	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	in %	Min	Max	Min	Max
Denstorf		921		3,0		2,763		15	2,349			
Klein Gl		408		3,0		1,224		15	1,040			
Wedtlens		1,769		3,0		5,307		15	4,511			
								0				
								0				
Summe		3,098				9,294			7,900			

Pkw-Fahrten/d Einwohner	
Pers./Pkw	
Min	Max

Wohnnutzung: Besucherverkehr

Gebiet	Nutzung	Anteil des Besucher- verkehrs	Wege/Werktag Besucher		MIV-Anteil Besucher	
		in %	Min	Max	Min	Max
Denstorf		5	138			
Klein Gl		5	61			
Wedtlens		5	265			
		0				
		0				
Summe			465			

Pkw-Fahrten/d Besucher	
Pers./Pkw	
Min	Max

Wohngebiete (WS, WR, WA, WB): Gesamtverkehr

Tagesbelastungen im Gesamtverkehr (ohne Wirtschaftsverkehr): Gebietsbezogener Verkehr [Wege/Fahrten mit allen Verkehrsmitteln]
Quell-/Zielverkehr und Binnenverkehr (d.h. Fahrten mit Quelle und/oder Ziel im Plangebiet)

Gebiet	Nutzung	Wohnnutzung				Gewerbliche Nutzung				Gesamtverkehr	
		Einwohner-Verkehr Wege/Fahrten		Besucher-Verkehr Wege/Fahrten		Beschäftigten-V. Wege/Fahrten		Kunden-Verkehr Wege/Fahrten		Wege/Fahrten	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Denstorf		2,349	2,349	138	138					2,487	2,487
Klein Gl		1,040	1,040	61	61					1,102	1,102
Wedtlens		4,511	4,511	265	265					4,776	4,776
Summe		7,900	7,900	465	465					8,365	8,365

Bild A 5-2 Ergebnisse des Programms „Ver_Bau“ für das OD-Zubringersystem Denstorf (aus BOSSERHOFF 2012)

3.2 Wohngebiete (WS, WR, WA, WB): Abschätzung des Verkehrsaufkommens

Hinweis: Nachfolgend wird die im Arbeitsblatt "Strukturgrößen" in der Tabelle am Schluss im fett umrahmten Teil gewählte Einwohnerzahl verwendet.

Wohnnutzung: Einwohnerverkehr

Gebiet	Nutzung	Einwohner		Wege/ Einwohner/d		Wege/Werktag insgesamt		Anteil der Einw.wege außerhalb des Gebiets	Wege/Werktag gebietsbezogen		MIV-Anteil Einwohner	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max		Min	Max	Min	Max
Lamme		4,930		3.0		14,790		15	12,572		100	
								0				
								0				
								0				
								0				
Summe		4,930				14,790			12,572			

Pkw-Fahrten/d Einwohner	
Pers./Pkw	
Min	Max

Wohnnutzung: Besucherverkehr

Gebiet	Nutzung	Anteil des Besucher- verkehrs	Wege/Werktag Besucher		MIV-Anteil Besucher	
			Min	Max	Min	Max
Lamme		5	740		100	
		0				
		0				
		0				
		0				
Summe			740			

Pkw-Fahrten/d Besucher	
Pers./Pkw	
Min	Max

Wohngebiete (WS, WR, WA, WB): Gesamtverkehr

Tagesbelastungen im Gesamtverkehr (ohne Wirtschaftsverkehr): Gebietsbezogener Verkehr [Wege/Fahrten mit allen Verkehrsmitteln]
 Quell-/Zielverkehr und Binnenverkehr (d.h. Fahrten mit Quelle und/oder Ziel im Plangebiet)

Gebiet	Nutzung	Wohnnutzung				Gewerbliche Nutzung				Gesamtverkehr	
		Einwohner-Verkehr Wege/Fahrten		Besucher-Verkehr Wege/Fahrten		Beschäftigten-V. Wege/Fahrten		Kunden-Verkehr Wege/Fahrten		Wege/Fahrten	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Lamme		12,572	12,572	740	740					13,311	13,311
Summe		12,572	12,572	740	740					13,311	13,311

Bild A 5-3 Ergebnisse des Programms „Ver_Bau“ für das OD-Zubringersystem Lamme (aus BOSSERHOFF 2012)

Anhang 6 Ganglinien der Nachfrage der OD-Zubringersysteme

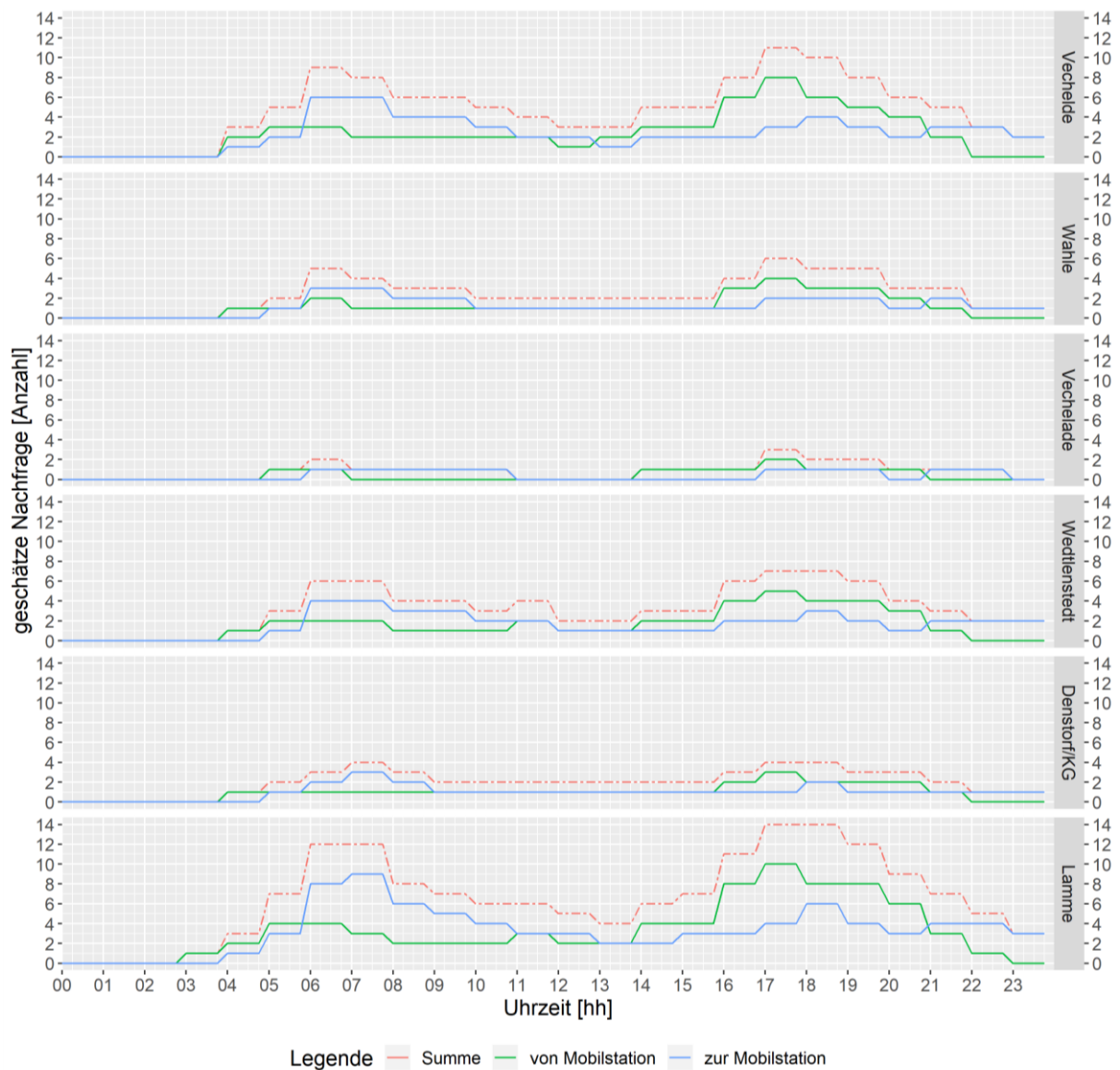


Bild A 6-1 Ganglinien der Nachfrage der OD-Zubringersysteme je Ort (15-Minuten-Zeitintervallen)
(eigene Darstellung)

Anhang 7 Anfrage-Profile für die Simulation der OD-Zubringersysteme

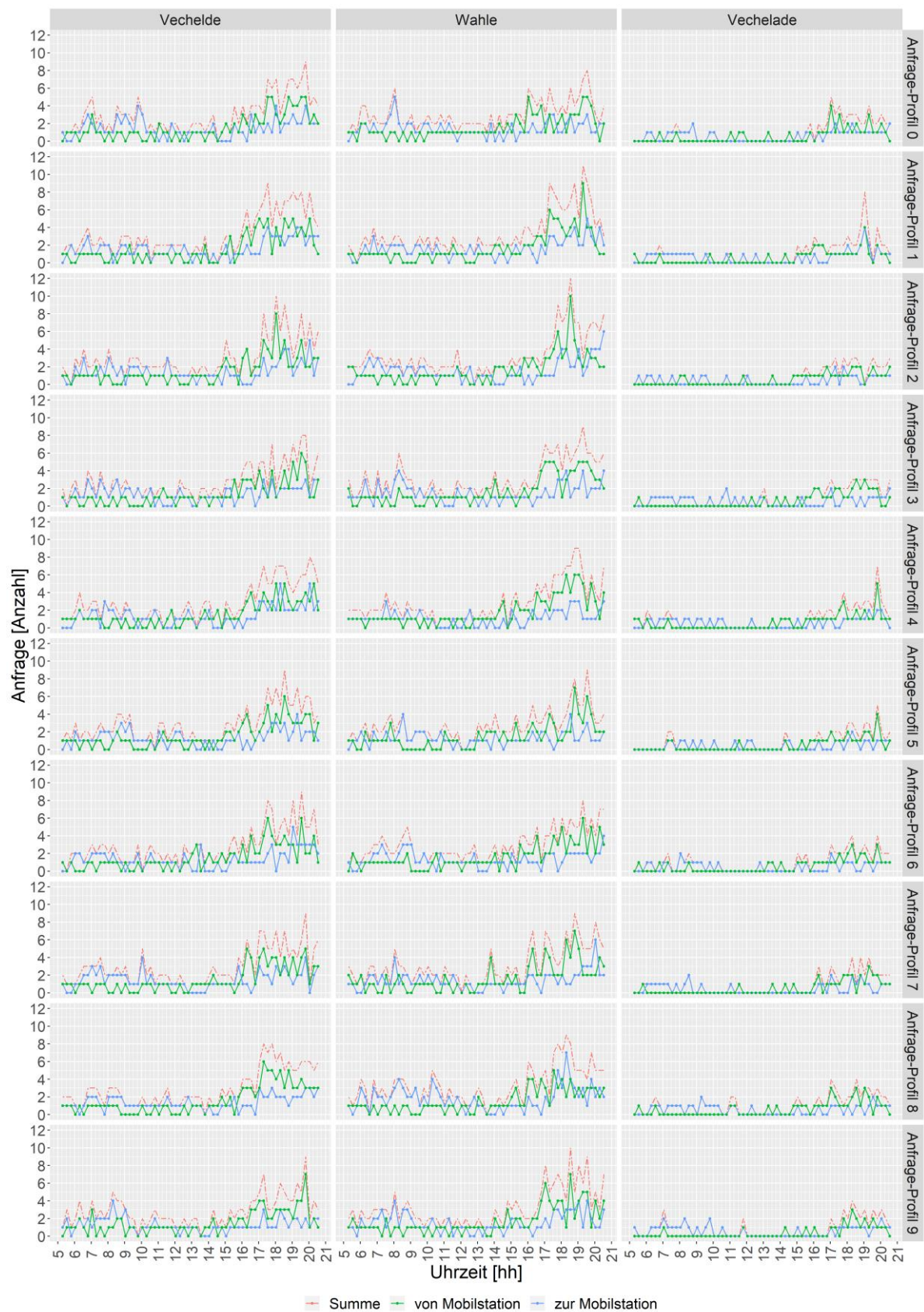


Bild A 7-1 Ganglinien der Anfragen an dem OD-Zubringersystem Vechelde nach Profil und Ort (eigene Darstellung)

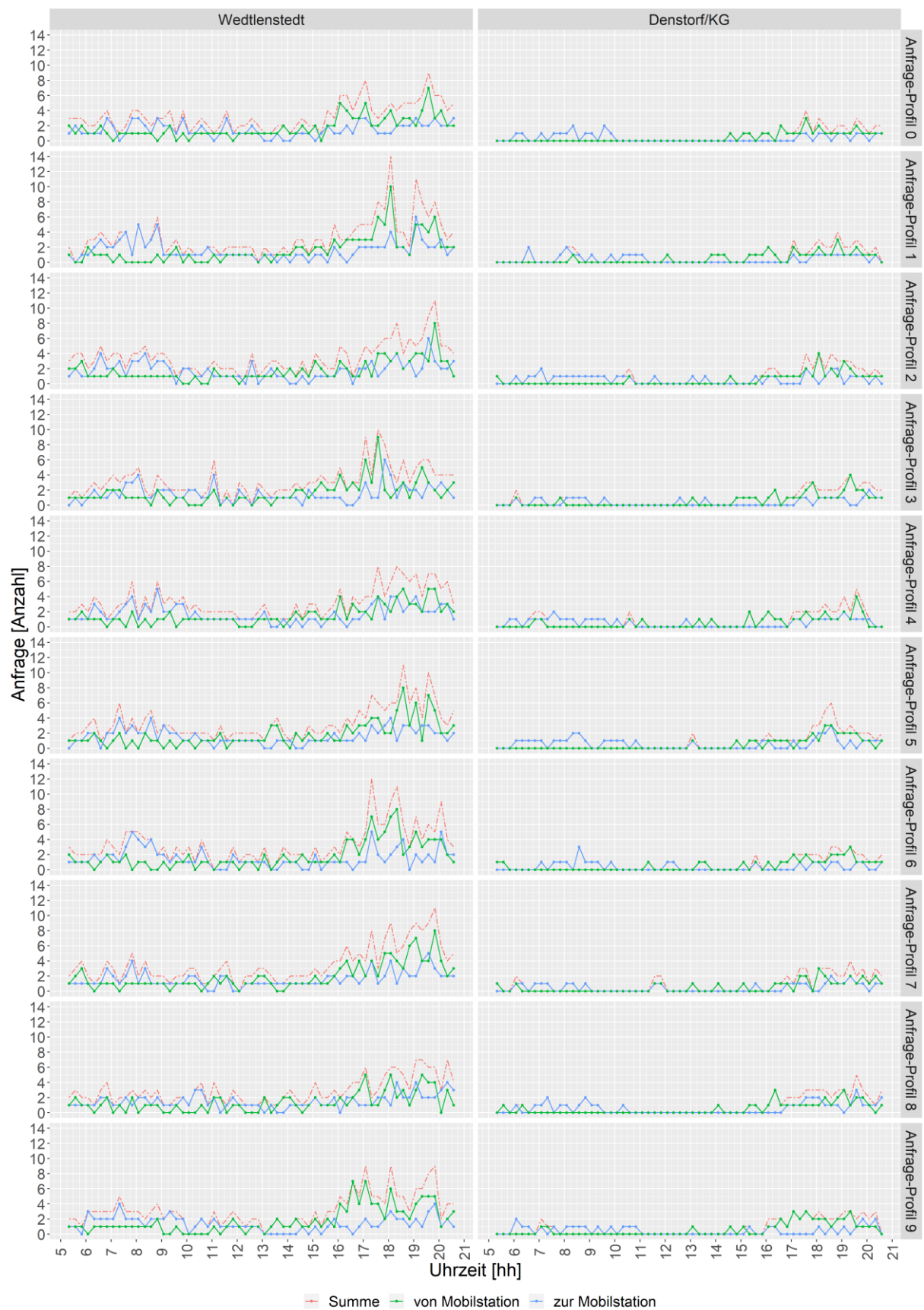


Bild A 7-2 Ganglinien der Anfragen an dem OD-Zubringersystems Denstorf nach Profil und Ort
(eigene Darstellung)

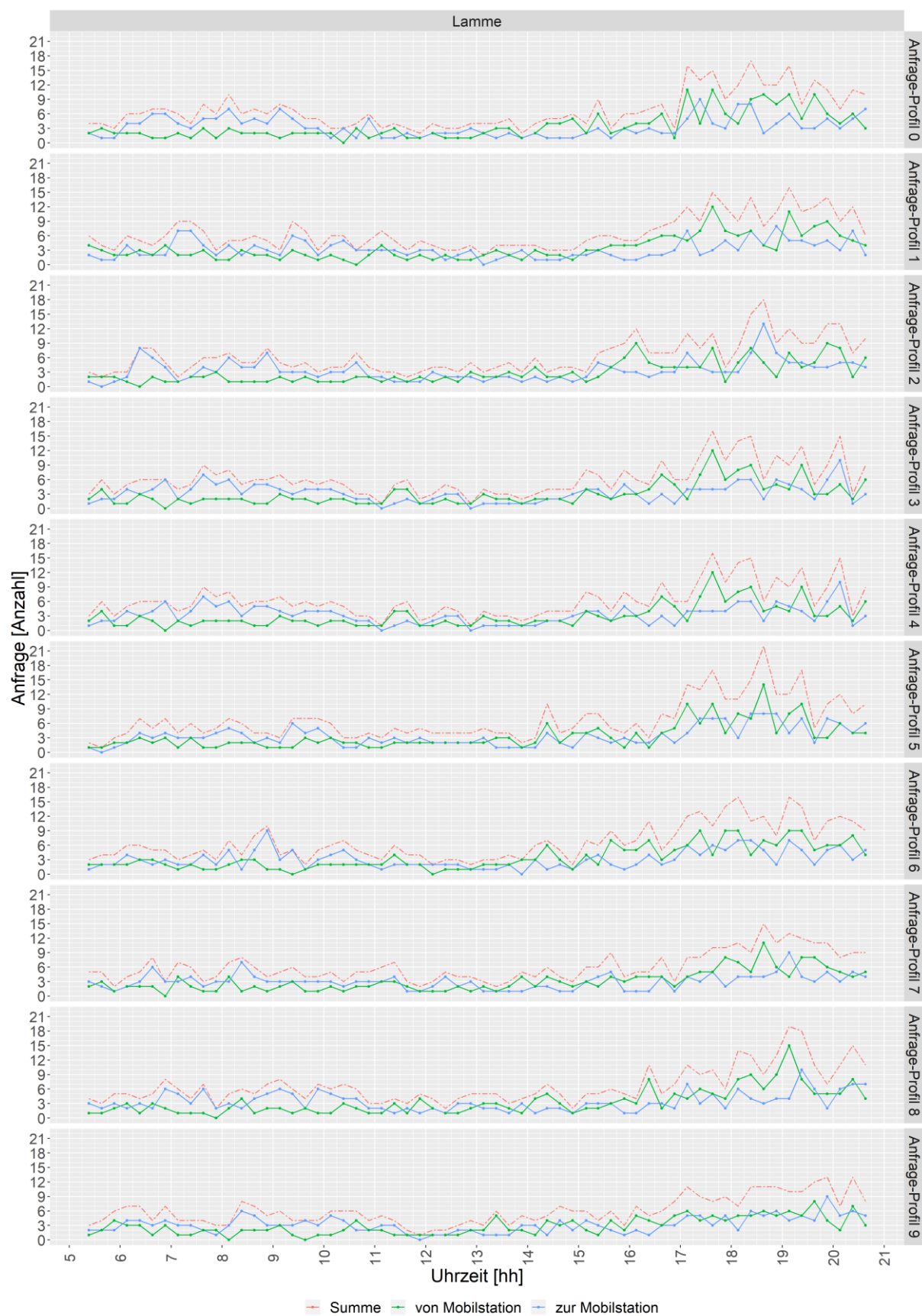


Bild A 7-3 Ganglinien der Anfragen an dem OD-Zubringersystems Lamme nach Profil und Ort
(eigene Darstellung)

Anhang 8 Simulation der Fuhrparkvarianten der OD-Zubringersysteme

Die Dateien sind auf der beigelegten CD gespeichert.

Anhang 9 Simulationsszenario 1 (Trunk-and-Feeder-System)

Die Dateien sind auf der beigelegten CD gespeichert.

Anhang 10 Simulationsergebnisse der OD-Zubringersysteme

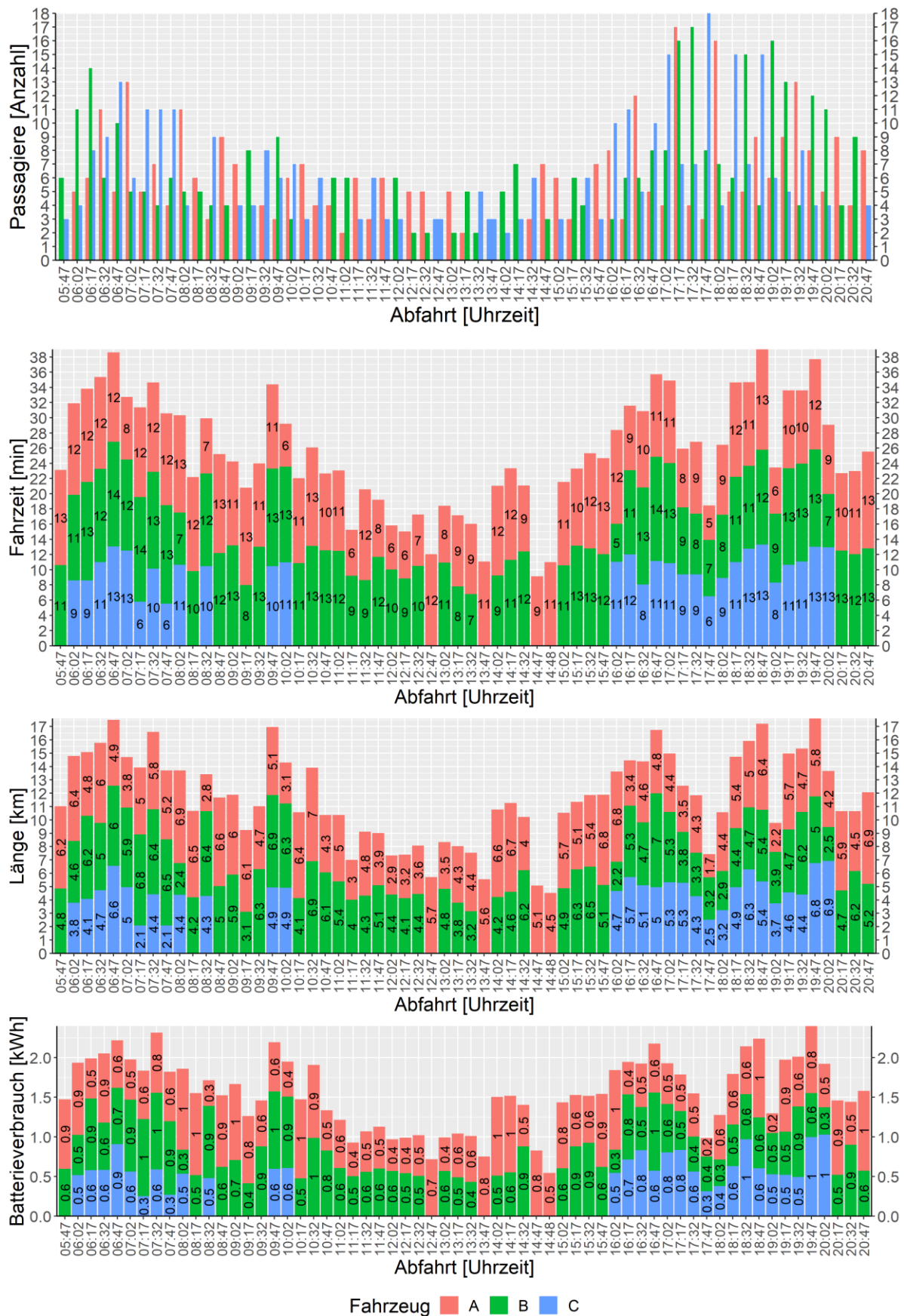


Bild A 10-1 OD-Zubringersystem Vechelde: Leistungsmerkmale pro Fahrt (eigene Darstellung)

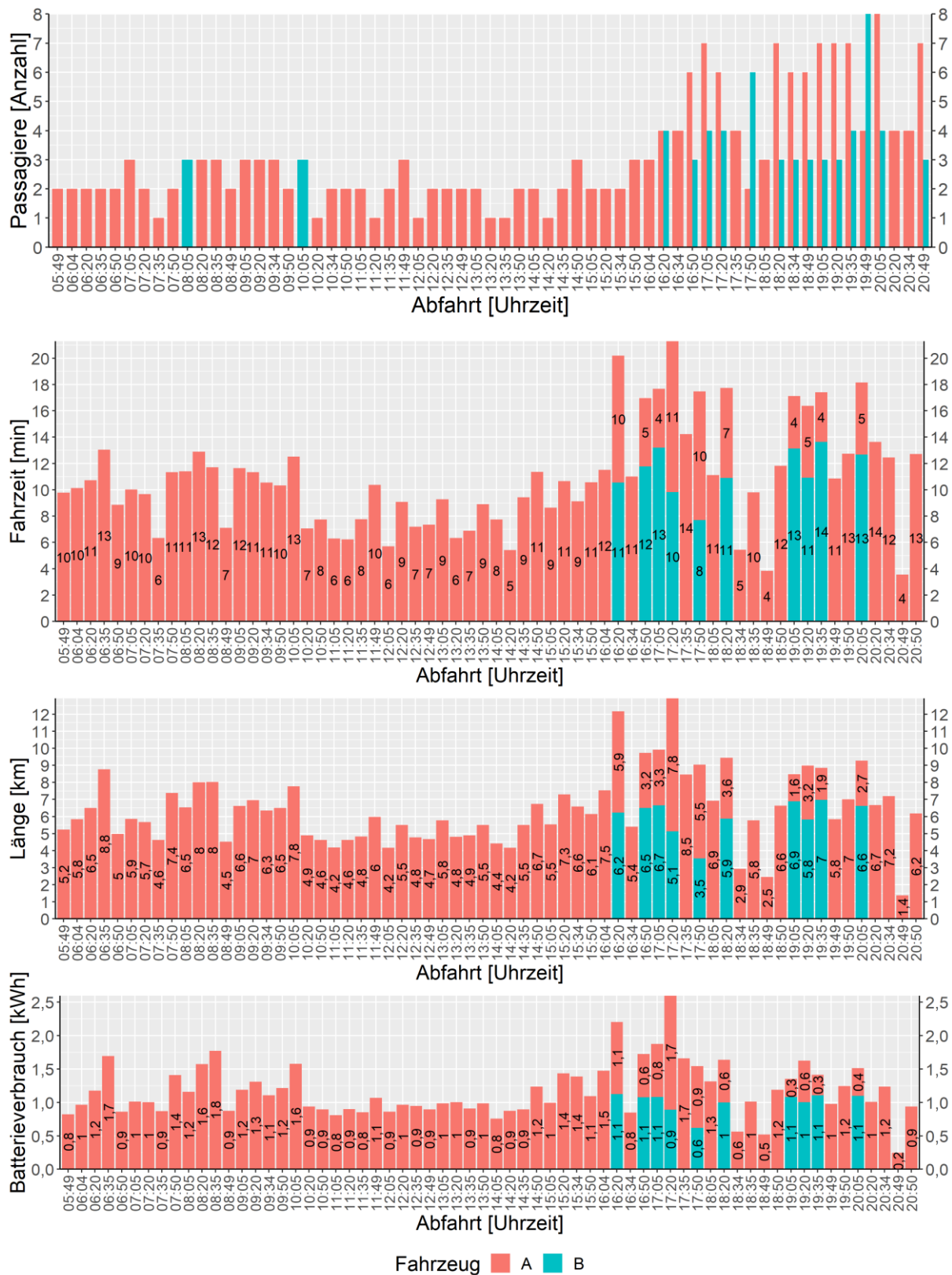


Bild A 10-2 OD-Zubringersystem Denstorf: Leistungsmerkmale pro Fahrt (eigene Darstellung)

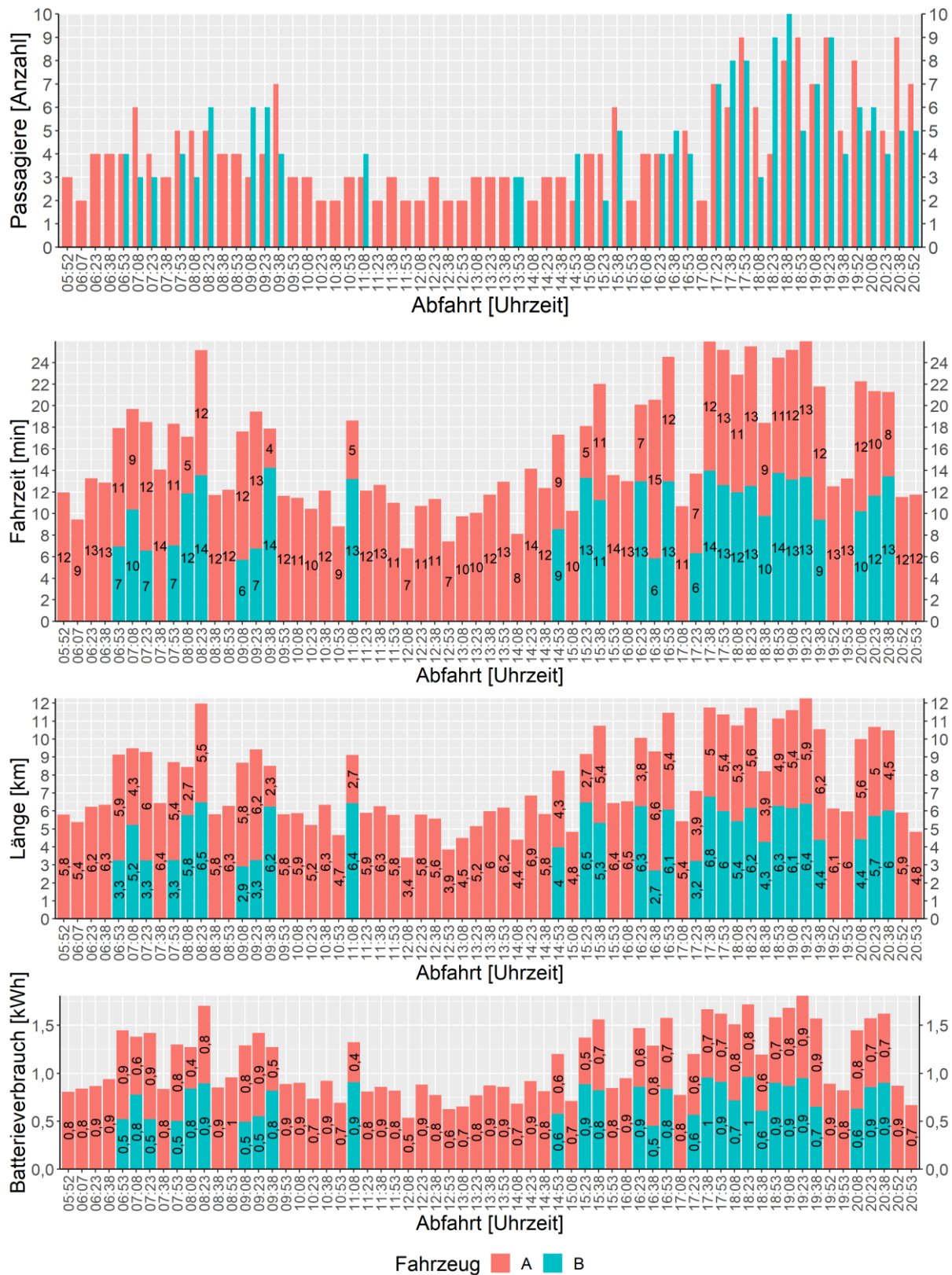


Bild A 10-3 OD-Zubringersystem Lamme: Leistungsmerkmale pro Fahrt (eigene Darstellung)

Anhang 11 Liniennetzplan und ÖPNV-Personenfahrten in Braunschweig

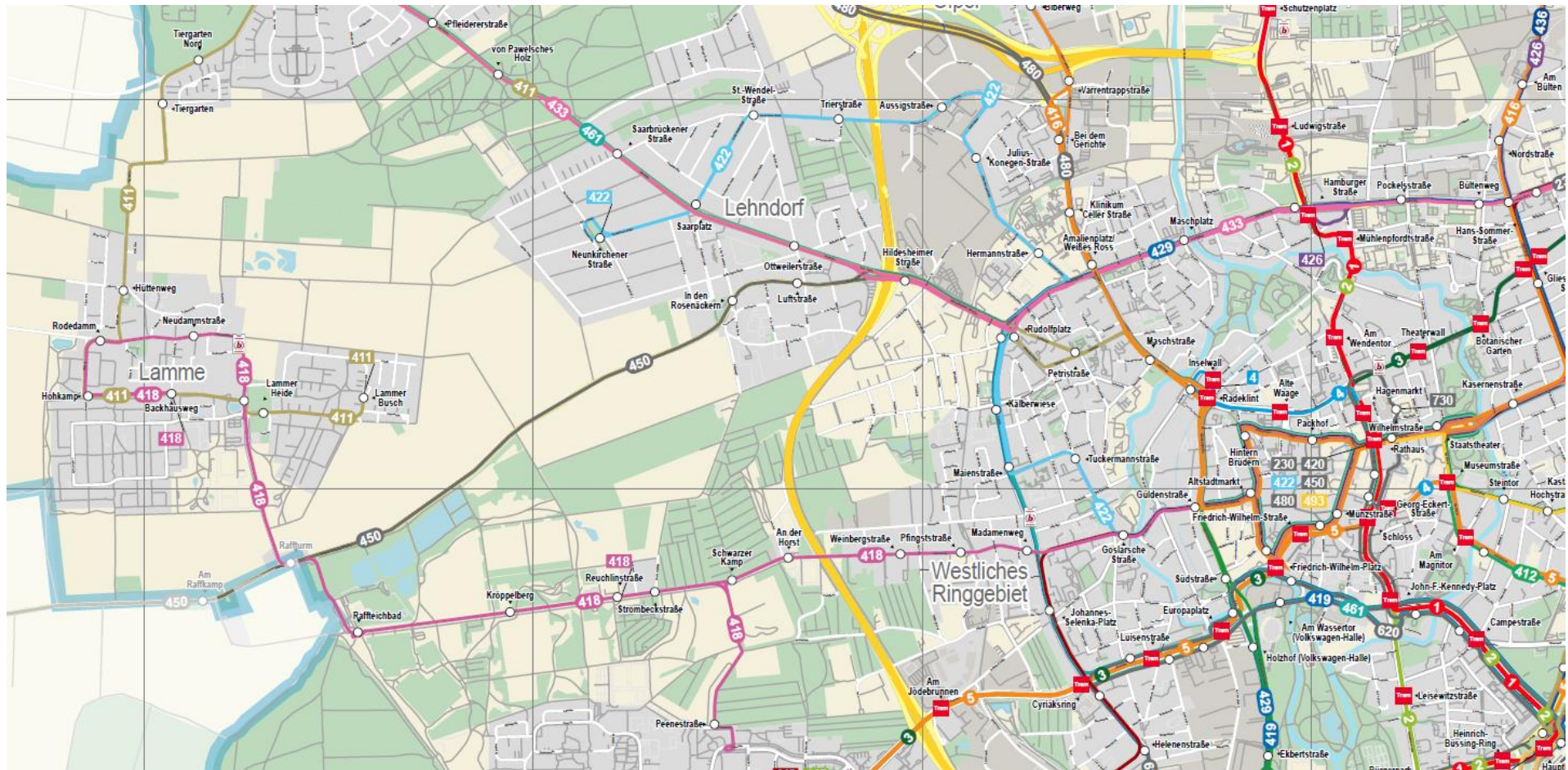


Bild A 11-1 Liniennetzplan der Stadt Braunschweig (Ausschnitt aus BRAUNSCHWEIGER VERKEHRS-GMBH o. J.)

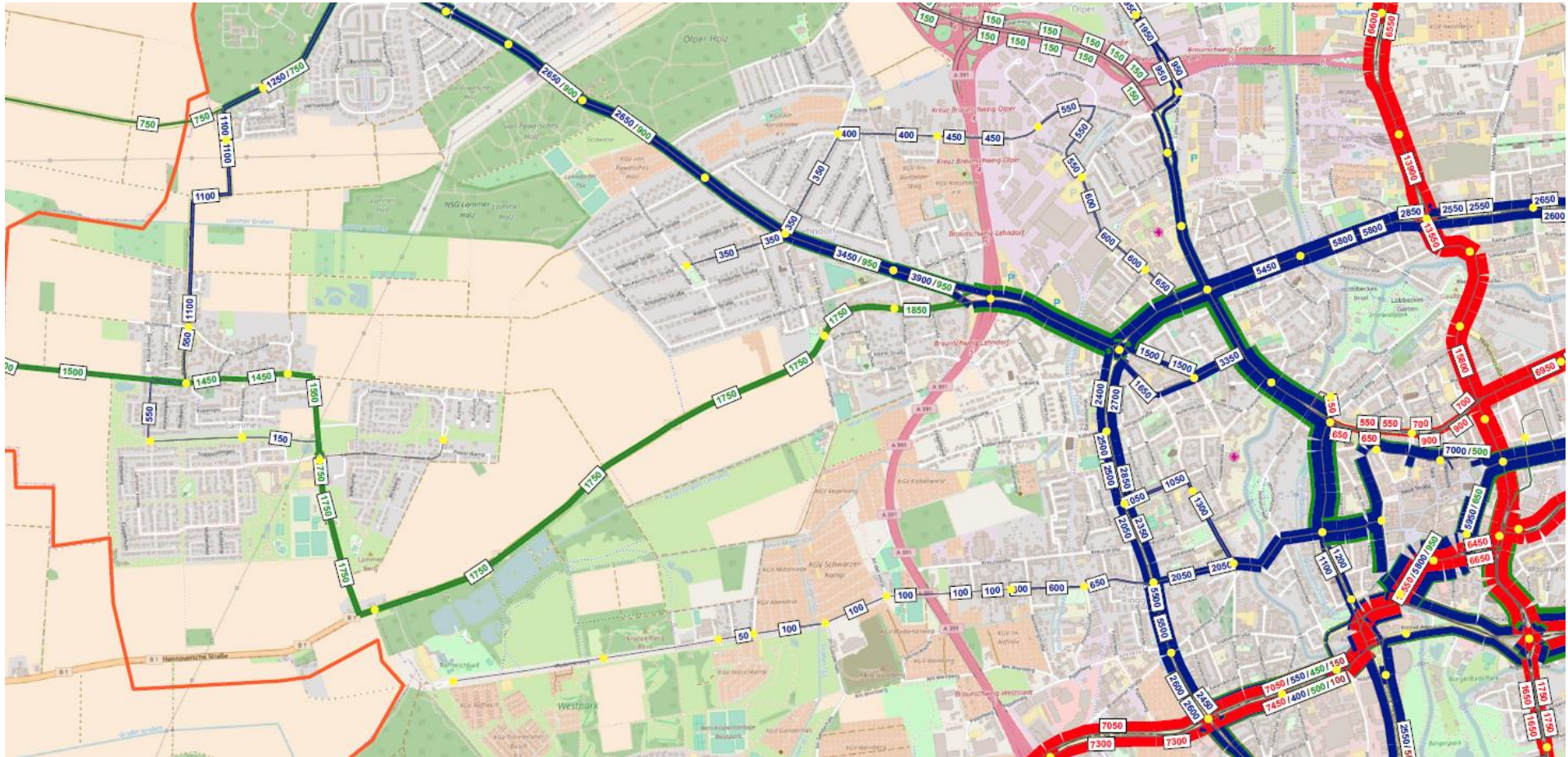


Bild A 11-2 Personenfahrten im werktäglichen ÖV in [Pers.F./24h] (Ausschnitt aus STADT BRAUNSCHWEIG o. J.)

Anhang 12 3D-Videos

Die Dateien sind auf der beigelegten CD gespeichert.

Anhang 13 Ermittlung der Betriebskosten

Tabelle A 13-1 Kilometerleistung, Energieverbrauch und Betriebsstunde je Fahrzeug

Fahrzeug	Werktag			Sa			So		
	km	kWh	Std	km	kWh	Std	km	kWh	Std
OD-Zubringersystem									
Vechelde A	307,81	41,51	15	286,27	38,60	15	-	-	-
Vechelde B	287,82	37,50	15	267,68	34,87	15	-	-	-
Vechelde C	135,23	17,83	10	125,76	16,58	10	-	-	-
Denstorf A	350,59	64,91	15	326,05	60,37	15	-	-	-
Denstorf B	60,22	10,07	5	56,01	9,36	5	-	-	-
Lamme A	332,96	48,42	15	309,65	45,03	15	-	-	-
Lamme B	148,05	21,71	10	137,69	20,19	10	-	-	-
BRT-System									
E-Gelenkbus 1	720,00	216,00	24	720,00	216,00	24	720,00	216,00	24
E-Gelenkbus 2	570,00	171,00	19	570,00	171,00	19	30,00	9,00	1
E-Gelenkbus 3	450,00	135,00	15	330,00	99,00	11	0,00	0,00	0
E-Gelenkbus 4	450,00	135,00	15	330,00	99,00	11	0,00	0,00	0

Tabelle A 13-2 Jährliche Kilometerleistung, Energieverbrauch und Betriebsstunde je Fahrzeug

Fahrzeug	Woche			Jahr		
	km	kWh	Betriebsstunde	km	kWh	Betriebsstunde
OD-Zubringersystem						
Vechelde A	1825,33	246,15	90	94917,39	12799,83	4680
Vechelde B	1706,79	222,36	90	88752,98	11562,56	4680
Vechelde C	801,89	105,74	60	41698,51	5498,48	3120
Denstorf A	2079,02	384,91	90	108109,09	20015,39	4680
Denstorf B	357,12	59,70	30	18570,35	3104,42	1560
Lamme A	1974,47	287,10	90	102672,21	14929,42	4680
Lamme B	877,96	128,75	60	45653,85	6695,12	3120
Summe				500374,37	74605,20	26520
BRT-System						
E-Gelenkbus 1	5040,00	1512,00	168	262080,00	78624,00	8736
E-Gelenkbus 2	3450,00	1035,00	115	179400,00	53820,00	5980
E-Gelenkbus 3	2580,00	774,00	86	134160,00	40248,00	4472
E-Gelenkbus 4	2580,00	774,00	86	134160,00	40248,00	4472
Summe				709800,00	212940,00	23660

Tabelle A 13-3 Ermittlung der Abschreibung- und Fremdkapitalkosten je Fahrzeug

	E-Gelenkbus	Elektroauto
Anschaffungskosten [€]	650.000	59.600
Nutzungsdauer [Jahr]	12	6
Fahrzeugrestwert [€]	97.500	8.940
Abschreibung pro Jahr-AfA [€]	46.042	8.443
Kalkulationszins (5%) [€]	18.688	1.714

Tabelle A 13-4 Berechnung der jährlichen Betriebskosten des BRT-Systems je Fahrzeug

Kostenposition	Kosten/Einheit	E-Gelenkbus 1		E-Gelenkbus 2		E-Gelenkbus 3		E-Gelenkbus 4		Summe Kosten [€/Jahr]
		Menge	[€/Jahr]	Menge	[€/Jahr]	Menge	[€/Jahr]	Menge	[€/Jahr]	
Energieverbrauch ¹	45 €/MWh	79	3.538	54	2.422	40	1.811	40	1.811	9.582
Instandhaltung ²	0,45 €/km	262080	117.936	179400	80.730	134.160	60.372	134.160	60.372	319.410
Personal ³ (Selbstkosten inkl. Lohnnebenkosten)	30 €/Std.	8736	262.080	5980	179.400	4.472	134.160	4.472	134.160	709.800
Abschreibung ⁴	46.042 €/Fz.-Jahr	1	46.042	1	46.042	1	46.042	1	46.042	184.167
Fremdkapitalzinsen (5%) ⁴	18.688 €/Fz.-Jahr	1	18.688	1	18.688	1	18.688	1	18.688	74.750
Kasko/Haftpflicht-Versicherung ⁴	7.000 €/Fz.-Jahr	1	7.000	1	7.000	1	7.000	1	7.000	28.000
Sonstige Kosten ⁴	8.000 €/Fz.-Jahr	1	8.000	1	8.000	1	8.000	1	8.000	32.000
Summe										1.357.709

1: Kosten/Einheit in [€/MWh] und Menge [MWh]; 2: Kosten/Einheit in [€/km] und Menge [km]; 3: Kosten/Einheit in [€/Betriebsstunde] und Menge [Betriebsstunde];

4: Kosten/Einheit in [€/Fz.-Jahr] und Menge [Fz.].

Tabelle A 13-5 Berechnung der jährlichen Betriebskosten des OD-Zubringersystems je Fahrzeug

Kostenposition	Kosten/ Einheit	Vechelde A		Vechelde B		Vechelde C		Denstorf A		Denstorf B		Lamme A		Lamme B		Summe Kosten [€/Jahr]
		M.	[€/Jahr]	M.	[€/Jahr]	M.	[€/Jahr]	M.	[€/Jahr]	M.	[€/Jahr]	M.	[€/Jahr]	M.	[€/Jahr]	
Energieverbrauch ¹	45	13	576	12	520	5	247	20	901	3	140	15	672	7	301	3.357
Instandhaltung ²	0,07	94.917	6.644	88.753	6.213	41.699	2.919	108.109	7.568	18.570	1.300	102.672	7.187	45.654	3.196	35.026
Personal ³	25	4.680	117.000	4.680	117.000	3.120	78.000	4.680	117.000	1.560	39.000	4.680	117.000	3.120	78.000	663.000
Abschreibung ⁴	8.443	1	8.443	1	8.443	1	8.443	1	8.443	1	8.443	1	8.443	1	8.443	59.103
Fremdkapitalzinsen ⁴	1.714	1	1.714	1	1.714	1	1.714	1	1.714	1	1.714	1	1.714	1	1.714	11.995
Kasko/Haftpflicht- Versicherung ⁴	2.000	1	2.000	1	2.000	1	2.000	1	2.000	1	2.000	1	2.000	1	2.000	14.000
Sonstige Kosten ⁴	1.500	1	1.500	1	1.500	1	1.500	1	1.500	1	1.500	1	1.500	1	1.500	10.500
Summe																796.981

1: Kosten/Einheit in [€/MWh] und Menge [MWh]; 2: Kosten/Einheit in [€/km] und Menge [km]; 3: Kosten/Einheit in [€/Betriebsstunde] und Menge [Betriebsstunde];

4: Kosten/Einheit in [€/Fz.-Jahr] und Menge [Fz.].